

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

**SEDE QUITO**

**CARRERA:**

**INGENIERÍA CIVIL**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:  
INGENIERO CIVIL**

**TEMA:**

**DISEÑO DE CIMENTACIÓN PARA UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO Y MESA  
DE CARGA EN CALIENTE SOMETIDA A FUERZAS DINÁMICAS PARA LA  
EMPRESA NOVACERO.S.A. EN PLANTA LASSO**

**AUTOR:**

**NÚÑEZ GÓMEZ ALEXIS PATRICIO**

**TUTOR:**

**JOSÉ DOMINGO ALVIAR MALABET (PHD)**

**Quito, febrero del 2020**

## **CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR**

Yo Alexis Patricio Núñez Gómez, con documento de identificación N° 1722688247, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de titulación intitulado: “DISEÑO DE CIMENTACIÓN PARA UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO Y MESA DE CARGA EN CALIENTE SOMETIDA A FUERZAS DINÁMICAS PARA LA EMPRESA NOVACERO.S.A. EN PLANTA LASSO”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Civil, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

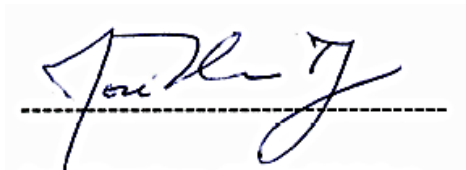


.....  
Alexis Patricio Núñez Gómez  
CI: 1722688247  
Quito, febrero del 2020

## **DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR**

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación, “DISEÑO DE CIMENTACIÓN PARA UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO Y MESA DE CARGA EN CALIENTE SOMETIDA A FUERZAS DINÁMICAS PARA LA EMPRESA NOVACERO.S.A. EN PLANTA LASSO” realizado por Alexis Patricio Núñez Gómez, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, febrero del 2020

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'José Domingo Alviar Malabet', is written over a horizontal dashed line.

José Domingo Alviar Malabet

## ÍNDICE

CAPITULO I.....	1
ANTECEDENTES Y GENERALIDADES .....	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.2.1 Objetivo General .....	2
1.2.2 Objetivos Específicos.....	2
1.3 ANTECEDENTES .....	2
1.4 ASPECTOS GENERALES DEL PROYECTO .....	3
1.4.1 Descripción del Proyecto .....	3
1.4.2 Uso de las máquinas del sistema de enfriamiento y mesa de carga en caliente para palanquilla.....	3
CAPITULO II .....	4
RECOPILACIÓN DE INFORMACIÓN.....	4
2.1 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS EQUIPOS .....	4
2.2 NORMAS (NEC 2015 E INTERNACIONALES).....	5
2.3 METODOLOGÍA DE DISEÑO.....	6
2.4 ESTUDIOS DE SUELO.....	6
2.4.1 ENTORNO Y PROYECTO.....	7
CAPITULO III.....	8
FUNDAMENTOS TEORICOS .....	8



3.1	TIPOS DE EQUIPOS DINÁMICOS .....	8
3.1.1	MÁQUINAS RECIPROCANTES .....	8
3.1.2	MÁQUINAS ROTATORIAS .....	9
3.1.3	MÁQUINAS DE IMPACTO .....	10
3.2	TIPO DE CIMENTACIONES ESPECIALES PARA EQUIPOS DINÁMICOS .....	11
3.2.1	CIMENTACIONES TIPO BLOQUE .....	11
3.2.2	CIMENTACIONES TIPO CAJA .....	12
3.2.3	CIMENTACIONES TIPO MURO .....	12
3.2.4	CIMENTACIONES TIPO PÓRTICO .....	12
CAPITULO VI.....		13
Estudio de las Máquinas y Tipo de Cimentación a utilizar en el Proyecto. ....		13
4.1	Categoría de Equipos utilizados en la Planta “NOVACERO” .....	13
4.1.1	DESCRIPCION DEL FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO. ....	14
4.1.2	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LAS MÁQUINAS .....	17
4.1.3	UBICACIÓN EN PLANTA DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO Y DE LA MESA DE CARGA EN CALIENTE.....	21
4.2	SELECCIÓN DEL TIPO DE CIMENTACIÓN .....	22
4.2.1	SISTEMA DE ENFRIAMIENTO (MESA DE ENFRIAMIENTO GALOPANTE).....	22

4.2.2	MESA DE ENFRIAMIENTO FINAL (COMPLEMENTO DE SISTEMA DE ENFRIAMIENTO) .....	23
4.2.3	MESA DE CARGA EN CALIENTE (SISTEMA DE CARGA EN CALIENTE)	
	23	
	CAPITULO V .....	24
	Metodología de Diseño de la Cimentación para el Proyecto .....	24
5.1	Estudio del Método de Diseño para el tipo de cimentación seleccionada. ....	24
5.1.1	DEFINICIONES .....	25
5.1.2	FACTORES QUE INTERVIENEN SOBRE UNA CIMENTACIÓN DE MAQUINÁRIA .....	29
5.1.3	ENFOQUE BÁSICO DEL MOVIMIENTO.....	32
5.1.4	COEFICIENTES DE RIGIDEZ DINÁMICOS .....	33
5.1.5	DISTINCIÓN DINÁMICA DE LA CIMENTACIÓN DE MAQUINARIA .....	45
5.2	Revisión de Normas de Diseño de cimentaciones para cargas dinámicas .....	60
5.2.1	ESTADO LÍMITE DE FALLA DEL SUELO .....	60
5.2.2	ESTADO LÍMITE DE FALLA DE LA CIMENTACIÓN.....	60
5.2.3	ESTADOS LÍMITES DE SERVICIO POR VIBRACIÓN DE MAQUINARIA.....	60
5.2.4	ESTADO LÍMITE POR RESONANCIA .....	62
5.2.5	ESTADO LÍMITE POR TRANSMISIÓN DE VIBRACIONES .....	63
5.3	Parámetros de Diseño del Suelo de Cimentación .....	63

5.3.1	TRABAJO DE CAMPO .....	63
5.3.2	TRABAJOS DE LABORATORIO.....	65
5.3.3	EVALUACIÓN DE CAPACIDAD DE CARGA.....	65
5.4	ASENTAMIENTOS TOLERABLES .....	71
CAPITULO VI.....		72
CÁLCULO Y DISEÑO DEL TIPO DE CIMENTACIÓN .....		72
6.1	CÁLCULO DE CIMENTACIÓN UTILIZANDO EXCEL.....	72
6.1.1	CÁLCULO DE CIMENTACIÓN PARA SISTEMA DE CARGA EN CALIENTE.....	72
6.1.2	CÁLCULO DE CIMENTACIÓN PARA MESA DE ENFRIAMIENTO GALOPANTE .....	87
6.2	ANÁLISIS DE DESPLAZAMIENTOS TOLERABLES Y CÁLCULO DEL MÓDULO DE BALASTO MEDIANTE PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS.....	97
6.2.1	ANÁLISIS Y CÁLCULOS PARA SISTEMA DE CARGA EN CALIENTE...	97
6.2.2	ANÁLISIS Y CÁLCULOS PARA LA MESA DE ENFRIAMIENTO GALOPANTE .....	101
6.3	VERIFICACIÓN DE FRECUENCIAS Y COEFICIENTES DE RIGIDEZ DINAMICA MEDIANTE SOFTWARE COMERCIAL .....	104
6.3.1	VERIFICACIÓN EN CIMENTACIÓN DE SISTEMA DE CARGA EN CALIENTE.....	104

6.3.2	VERIFICACIÓN EN CIMENTACIÓN DE MESA DE ENFRIAMIENTO GALOPANTE .....	110
6.4	DISEÑO DE CIMENTACIONES MEDIANTE SOFTWARE SAP2000 Y SAFE .....	115
6.4.1	DISEÑO EN SAP2000 DE LA CIMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CARGA EN CALIENTE .....	115
6.4.2	DISEÑO EN SAP 2000 DE LA CIMENTACIÓN DE LA MESA DE ENFRIAMIENTO GALOPANTE .....	125
6.5	PLANOS DE INGENIERIA Y DETALLES .....	134
CAPITULO VII .....		135
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....		135
7.1	CONCLUSIONES .....	135
7.2	RECOMENDACIONES .....	140
7.3	Bibliografía .....	141
7.4	ANEXOS .....	143
7.4.1	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LA MAQUINARIA .....	143
7.4.2	ANEXO DEL CÁLCULO DE DISEÑO DE LA METODOLOGÍA .....	148
7.4.3	INFORME DEL ESTUDIO DE SUELOS PRESENTADO A LA EMPRESA .....	160

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Sección Transversal del Sistema de Enfriamiento o Mesa de Enfriamiento Galopante de Palanquillas .....	4
Figura 2 Sección Transversal de Sistema de Mesa de Carga en Caliente de Palanquilla .....	5
Figura 3. Diagrama de Equipo Reciproco;.....	9
Figura 4. Diagrama de Equipo Giratorio.....	9
Figura 5. Cimentación tipo bloque.....	11
Figura 6. Cimentación tipo caja. ....	12
Figura 7. Cimentación tipo muro. ....	12
Figura 8. Cimentación tipo pórtico. ....	13
Figura 9 Tren 2 de Laminación .....	14
Figura 10 Palanquilla .....	14
Figura 11 Stand de Desbaste .....	15
Figura 12 Stand de Canteado .....	15
Figura 13 Ángulos laminados .....	16
Figura 14 Máquina de Cizalla Volante .....	16
Figura 15 Perfiles Enderezados.....	17
Figura 16 Mesa de Enfriamiento Galopante .....	18
Figura 17 Instalación General .....	19
Figura 18 Sistema de funcionamiento en Horno .....	20
Figura 19 Ubicación de Proyecto en Planta .....	21
Figura 20 Esquema de Cimentación para Sistema de Enfriamiento .....	22
Figura 21 Esquema de Losa para Mesa de enfriamiento final .....	23

Figura 22 Esquema de Cimentación de Mesa de Carga en Caliente.....	24
Figura 23 Péndulo Simple .....	27
Figura 24 Sistema de dos Grados de Libertad.....	27
Figura 25 Sistema de tres Grados de Libertad .....	27
Figura 26 Sistema con infinitud de Grados de Libertad .....	28
Figura 27 Grados de Libertad de un Bloque de Cimentación .....	31
Figura 28 Enfoque Básico y Parámetros del Movimiento .....	33
Figura 29 Ejes Globales y forma de la cimentación .....	34
Figura 30 Rigidez vertical $S_z$ contra la geometría rectangular de una cimentación en planta	35
Figura 31 Módulo de rigidez vertical $K_z$ vs frecuencia de la máquina para diferentes geometrías de cimentación.....	36
Figura 32 Factor de reacción estática horizontal $S_y$ , $S_x$ , en (a) dirección corta, (b) en dirección longitudinal contra factores de forma de la cimentación .....	38
Figura 33 Rigidez dinámica horizontal $K_y$ de lado corto vs frecuencia de la máquina a diferentes formas geométricas rectangulares de la cimentación .....	39
Figura 34 Rigidez dinámica por cabeceo en dirección del eje a) Corto, b) longitudinal, vs frecuencia de la máquina de diferentes formas de cimentación.....	42
Figura 35 Rigidez torsional dinámica $K_t$ vs frecuencia de la máquina para diferentes formas geométricas .....	45
Figura 36 Grados de libertad en un bloque de cimentación .....	46
Figura 37 Vibración en un bloque de cimentación. (a) Vibración vertical, (b) vibración horizontal, (c) vibración por cabeceo, (d) Vibración por torsión. ....	47

Figura 38 Bloque de cimentación bajo carga dinámica vertical. (a) bloque desplantado a una profundidad $D_f$ , (b) bloque desplantado a nivel del piso para análisis, (c) suelo representado por resortes equivalentes $K$ , (d) sistema equivalente resorte-masa para análisis.....	50
Figura 39 Bloque de cimentación sujeto a vibración horizontal .....	51
Figura 40 Bloque de cimentación bajo vibraciones de cabeceo .....	53
Figura 41 Bloque de cimentación bajo vibración por torsión .....	55
Figura 42 Bloque de cimentación expuesto a fuerzas dinámicas simultáneas.....	57
Figura 43 Límites de amplitud del deslizamiento en función de la frecuencia.....	61
Figura 44 Fenómeno de resonancia.....	62
Figura 45 Inicio de la perforación .....	64
Figura 46 Ciclo de Histéresis .....	70
Figura 47 Cimentación en planta .....	72
Figura 48 Corte A-A .....	73
Figura 49 Corte B-B.....	73
Figura 50 GEOMETRÍA DE CIMENTACIÓN .....	75
Figura 51 Coeficiente de rigidez vertical $K_z$ contra diferentes formas geométricas de cimentación para suelo no saturado .....	77
Figura 52 Rigidez dinámica horizontal de lado corto para diferente relaciones de $L/B$ .....	77
Figura 53 Rigidez dinámica por cabeceo en dirección del eje: (a) corto, (b) longitudinal para diferentes relaciones de $L/B$ .....	78
Figura 54 Rigidez torsional dinámica para diferentes formas de cimentación .....	79
Figura 55 Cálculo de los Coeficientes elásticos del suelo en el Sistema de Carga en Caliente y Momentos de Masa .....	81

Figura 56 Seccionamiento de la Cimentación del Sistema de Carga en Caliente.....	82
Figura 57 Momentos de Inercia de Masa en la Cimentación de Carga en Caliente .....	83
Figura 58 Parámetros Dinámicos de la Cimentación de Carga en Caliente.....	83
Figura 59 Vibración Simultánea de Carga en Caliente .....	85
Figura 60 Combinación Final de Amplitudes del Sistema de Carga en Caliente .....	86
Figura 61 Cimentación en planta de mesa galopante .....	87
Figura 62 Corte B'-B' .....	88
Figura 63 Corte C'-C' .....	88
Figura 64 Geometría de la parte más crítica .....	90
Figura 65 Cálculo de los Coeficientes elásticos del suelo en la Mesa de Enfriamiento y Momentos de Masa .....	93
Figura 66 Seccionamiento de la Cimentación de la Mesa de Enfriamiento.....	93
Figura 67 Momentos de Inercia de Masa en la Cimentación de la Mesa de Enfriamiento.....	94
Figura 68 Parámetros Dinámicos de la Cimentación de la Mesa de Enfriamiento.....	95
Figura 69 Vibración Simultánea de la Mesa de Enfriamiento. ....	95
Figura 70 Combinación Final de Amplitudes de la Mesa de Enfriamiento. ....	96
Figura 71 Geometría de cimentación del sistema de Carga en Caliente .....	98
Figura 72 Modelado de terreno de desplante de cimentación de Carga en Caliente .....	98
Figura 73 Resultado de desplazamiento de la cimentación modelada producida por cargas (Carga en C.).....	99
Figura 74 Gráfica Representativa (Carga Vs Desplazamiento) .....	100
Figura 75 Geometría de cimentación de la mesa de enfriamiento .....	101
Figura 76 Modelado de terreno de desplante de cimentación de la Mesa de Carga .....	102



Figura 77 Resultado de desplazamiento de la cimentación modelada producida por cargas (Mesa de Enfri.) .....	102
Figura 78 Gráfica Representativa (Carga Vs Desplazamiento) .....	103
Figura 79 Introducción de datos requeridos en Cimentación de Carga en Caliente .....	105
Figura 80 Parámetros del suelo y Cargas Aplicadas del Sistema de Carga en Caliente .....	106
Figura 81 Amplitudes Traslacionales para diferentes frecuencias realizadas en programa comercial.....	109
Figura 82 Introducción de datos requeridos en Cimentación de la Mesa de enfriamiento ....	110
Figura 83 Parámetros del suelo y Cargas Aplicadas del Sistema de la Mesa de Enfriamiento .....	111
Figura 84 Amplitudes Traslacionales para diferentes frecuencias realizadas en programa comercial.....	114
Figura 85 Modelado en SAP 2000 de la cimentación de carga en caliente .....	115
Figura 86 Ingreso del tipo de material para cimentación de carga en caliente .....	116
Figura 87 Combinación de cargas en Sistema de carga en caliente.....	116
Figura 88 Aplicación de Cargas en Cimentación del Sistema de Carga en Caliente.....	117
Figura 89 Ingreso del módulo de balasto para cimentación de la carga en caliente .....	117
Figura 90 Diseño de la Cimentación del sistema de carga en caliente .....	118
Figura 91 Momentos y Cortes Máximos de la cimentación de carga en caliente.....	119
Figura 92 Modelado de Cimentación de Carga en caliente en SAFE.....	119
Figura 93 Exportación de las Cargas del sistema de carga en caliente al programa SAFE ...	120
Figura 94 Ingreso del módulo de balasto en SAFE del sistema de carga en caliente .....	120
Figura 95 Deformación Producida en Cimentación de carga en caliente .....	121

Figura 96 Diagrama de presión del suelo de desplante de cimentación de carga en caliente	121
Figura 97 Diagramas de Momentos máximos producidos en las vigas de la cimentación de carga en caliente.....	122
Figura 98 Diagrama de Cortes máximos de la cimentación de carga en caliente .....	122
Figura 99 Diagrama de Aceros de refuerzo en vigas requeridos para la cimentación de carga en caliente .....	123
Figura 100 Diagrama de Aceros transversal en vigas requeridos para la cimentación de carga en caliente .....	123
Figura 101 Acero de Refuerzo en zapatas corridas de la cimentación de la carga en caliente .....	124
Figura 102 Acero Trasversal en zapatas corridas de la cimentación de la carga en caliente.	124
Figura 103 Modelado en SAP 2000 de la cimentación de la mesa de enfriamiento.....	125
Figura 104 Ingreso del tipo de material para cimentación de carga en caliente .....	126
Figura 105 Combinación de cargas en Mesa de enfriamiento .....	126
Figura 106 Aplicación de Cargas en Cimentación de la Mesa de Enfriamiento .....	127
Figura 107 Ingreso del módulo de balasto para cimentación de la Mesa de Enfriamiento ...	127
Figura 108 Diseño de la Cimentación de la Mesa de Enfriamiento.....	128
Figura 109 Momentos y Cortes Máximos de la cimentación de la Mesa de Enfriamiento ...	128
Figura 110 Modelado de Cimentación de la Mesa de enfriamiento en SAFE .....	129
Figura 111 Exportación de las Cargas de la Mesa de Enfriamiento al programa SAFE .....	129
Figura 112 Ingreso del módulo de balasto en SAFE de la Mesa de enfriamiento .....	130
Figura 113 Deformación Producida en Cimentación de la Mesa de Enfriamiento.....	130

Figura 114 Diagrama de presión del suelo de desplante de cimentación de la Mesa de Enfriamiento .....	131
Figura 115 Diagramas de Momentos máximos producidos en las vigas de la cimentación de la Mesa de Enfriamiento .....	131
Figura 116 Diagrama de Cortes máximos de la cimentación de carga en caliente .....	132
Figura 117 Diagrama de Aceros de refuerzo en vigas requeridos para la cimentación de la Mesa de Enfriamiento .....	132
Figura 118 Diagrama de Aceros transversal en vigas requeridos para la cimentación de la Mesa de Enfriamiento .....	133
Figura 119 Acero de Refuerzo en losa de la cimentación de la Mesa de Enfriamiento.....	133
Figura 120 Acero Transversal en la losa de la cimentación de la mesa de enfriamiento.....	134
Figura 121 Límites de amplitud del deslizamiento en función de la frecuencia para el sistema de carga en caliente.....	135
Figura 122 Mesa de Enfriamiento Galopante .....	143
Figura 123 Instalación General .....	145
Figura 124 Detalle de concepto sistema de carga en caliente .....	145
Figura 125 Detalle de concepto sistema carga desde puente de carga hasta el camino de rodillos hacia el horno.....	146
Figura 126 Sistema de funcionamiento en Horno .....	147
Figura 127 Cálculo de Rigidez Dinámica Vertical para Cimentación de Carga en Caliente.	148
Figura 128 Cálculo de Rigidez Dinámica Horizontal para Cimentación de Carga en Caliente .....	150

Figura 129 Cálculo de Rigidez Dinámica por Cabeceo para Cimentación de Carga en Caliente	151
Figura 130 Cálculo de Rigidez Dinámica por Torsión para Cimentación de Carga en Caliente	151
Figura 131 Cálculo de Frecuencias Naturales de la Cimentación de Carga en Caliente. ....	154
Figura 132 Cálculo de Rigidez Dinámica Vertical para Cimentación de la Mesa de Enfriamiento .....	154
Figura 133 Cálculo de Rigidez Dinámica Horizontal para Cimentación de la Mesa de Enfriamiento .....	155
Figura 134 Cálculo de Rigidez Dinámica por Cabeceo y Torsión para Cimentación de la Mesa de Enfriamiento.....	158
Figura 135 Cálculo de Frecuencias Naturales de la Cimentación de la Mesa de Enfriamiento.	159

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Grafico 1 Relación de Rigidez Traslacional y Frecuencia del sistema de Carga en Caliente	107
Grafico 2 Relación de Coeficientes Dinámicos Rotacionales Para Carga en Caliente .....	108
Grafico 3 Relación de Rigidez Traslacional y Frecuencia de la Mesa de Enfriamiento.....	112
Grafico 4 Relación de Coeficientes Dinámicos Rotacionales Para Mesa de Enfriamiento ...	113
Grafico 6 Amplitud del sistema de carga en caliente realizada por el software .....	136
Grafico 7 Comparación de Amplitud del sistema de carga en caliente entre Excel y Software .....	137
Grafico 8 Amplitud de la mesa de enfriamiento .....	138
Grafico 9 Comparación de Amplitud de la mesa de enfriamiento galopante entre Excel y Software .....	139

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Categoría de la Unidad de Construcción.....	7
Tabla 2 Parámetros Geotécnicos.....	7
Tabla 3 Factores de forma, profundidad e inclinación recomendados para su uso.....	67
Tabla 4 Rango de valores típicos de la relación de poisson.....	69
Tabla 5 Parámetros del Suelo Obtenidos en Campo y Laboratorio del Sistema de C. en C....	73
Tabla 6 Factores de Capacidad de Carga, Forma, Profundidad e inclinación de la Cimentación de C. en C.....	74
Tabla 7 Resultados de Capacidad Admisible de Cimentación de C. en C.....	74
Tabla 8 Capacidad Admisible por Asentamiento en Sistema de Carga en Caliente.....	74
Tabla 9 Parámetros Dinámicos del suelo de la Carga en Caliente.....	75
Tabla 10 Datos Necesarios para Cálculo de Coeficientes de Rigidez Dinámica en el Sistema de C. en C.....	75
Tabla 11 Parámetros de la máquina .....	76
Tabla 12 Resultados de los Parámetros Dinámicos en el Sistema de Carga en Caliente.....	79
Tabla 13 Determinación del Centro de gravedad del sistema de Carga en Caliente .....	82
Tabla 14 Resumen de resultados de frecuencias y amplitudes del sistema de Carga en Caliente .....	86
Tabla 15 Parámetros del Suelo Obtenidos en Campo y Laboratorio de la Mesa de Enfriamiento .....	88
Tabla 16 Factores de Capacidad de Carga, Forma, Profundidad e inclinación de la Cimentación de Mesa de Enfriamiento.....	89
Tabla 17 Resultados de Capacidad Admisible de Cimentación de la Mesa de Enfriamiento.	89

Tabla 18 Capacidad Admisible por Asentamiento en la Mesa de Enfriamiento. ....	90
Tabla 19 Parámetros Dinámicos del suelo Mesa de enfriamiento .....	90
Tabla 20 Datos Necesarios para Cálculo de Coeficientes de Rigidez Dinámica en la Mesa de Enfriamiento. ....	91
Tabla 21 Parámetros de la máquina de Enfriamiento galopante .....	91
Tabla 22 Resultados de los Parámetros Dinámicos en la Mesa de Enfriamiento. ....	92
Tabla 23 Centro de gravedad de Sección crítica de Mesa de Enfriamiento.....	94
Tabla 24 Resumen de resultados de frecuencias y amplitudes para la sección referencia de la Mesa de Enfriamiento .....	96
Tabla 25 Resultados de Coeficientes de Rigidez Dinámica Traslacional en Sistema de carga en caliente .....	107
Tabla 26 Resultados de Coeficientes de Rigidez Dinámica Rotacional en Sistema de carga en caliente .....	108
Tabla 27 Resumen Comparativo de Amplitudes Determinadas para la Cimentación de Carga en Caliente. ....	109
Tabla 28 Resultados de Coeficientes de Rigidez Dinámica Traslacional en Mesa de Enfriamiento .....	112
Tabla 29 Resultados de Coeficientes de Rigidez Dinámica Rotacional en la Mesa de Enfriamiento .....	113
Tabla 30 Resumen Comparativo de Amplitudes Determinadas para la Cimentación de la Mesa de Enfriamiento.....	114
Tabla 31 Resumen de Resonancias y Amplitudes calculadas para la Cimentación de Carga en Caliente .....	136

Tabla 32 Comparación de amplitudes del sistema de Carga en Caliente.....	137
Tabla 33 Resumen de Resonancias y Amplitudes calculadas para la Cimentación de la Mesa de Enfriamiento.....	138
Tabla 34 Resumen comparativo entre Amplitudes Calculadas para la Cimentación de la Mesa de Enfriamiento.....	139



## **RESUMEN**

La empresa NOVACERO S.A. es una de las más grandes productoras de elementos de acero en el país; en la Planta de NOVACERO en Lasso, se fabrican constantemente una gran variedad de productos comerciales como varillas, perfiles, alambρόn entre otros. En los últimos años debido a su alta demanda en el mercado nacional se han visto en la necesidad de incrementar su producción para poder cumplir con los requerimientos del mercado y con normas de calidad que los caracteriza.

Por causa de esto solicitan a la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Politécnica Salesiana mediante este trabajo de titulación realizar un diseño de cimentación de un sistema de enfriamiento y mesa de carga en caliente de materia prima (palanquillas) que les permitirá agilizar los procesos y mejorar en un gran porcentaje su producción. Uno de los elementos importantes dentro de este trabajo es el correcto diseño de las cimentaciones, ya que a través de estas las estructuras transmiten sus cargas hacia ellas, mismas que posteriormente las transfieren al suelo de desplante. Sin embargo, empresas como NOVACERO realizan procesos de fabricación de una manera automatizada utilizando maquinarias para su ejecución; debido a todo esto se debe analizar condiciones adicionales para el diseño de las cimentaciones ya que se trata de máquinas industriales que generan cargas dinámicas por las cuales se ha tenido que utilizar nuevas metodologías para alcanzar el diseño óptimo de este tipo de cimentaciones.

El presente estudio muestra la selección del tipo de cimentación, el cálculo y diseño de la cimentación creando un programa en Excel en donde se considerarán las cargas dinámicas, normas vigentes y propiedades del suelo que intervienen en su diseño y para finalizar, se procederá a la verificación de los resultados a través de un modelo previamente elaborado en un software comercial.

Se concluye el proyecto con la elaboración de los planos de cimentación que servirán de soporte a la nueva maquinaria que complementará al tren de laminación empleado en la planta de NOVACERO, el equipo constará de un sistema de enfriamiento o mesa de enfriamiento galopante para palanquillas y un sistema de mesa de carga en caliente de palanquilla.

## **ABSTRACT**

The company NOVACERO S.A. it is one of the largest producers of steel elements in the country. At NOVACERO Plant in Lasso, a wide variety of commercial products such rods, profiles, wire rod, among others, are constantly manufactured. In recent years, due to their high demand in the national market, they have seen the need to increase their production in order to meet market requirements and quality standards that characterize them.

Because of this, they request the Civil Engineering career of the Salesian Polytechnic University through this titling work to elaborate a foundation design of a cooling system and a hot load table of raw material (billets) that will allow them to streamline processes and improve its production by a large percentage. One of the important elements in this work is the correct design of the foundations, since through these the structures transmit their loads to them, which subsequently transfer them to the floor. However, companies like NOVACERO carry out manufacturing processes in an automated way using machinery for their execution. Due to all the previous, additional conditions for the design of the foundations must be analyzed since they are industrial machines that generate dynamic loads, for which new methodologies have had to be used to achieve the optimal design of this type of foundations.

The present study shows the selection of the type of foundation, the calculation and design of the foundation creating an Excel program where the dynamic loads, current standards and soil properties involved in its design will be considered and finally, will proceed to the Verification of the results through a model previously developed in a commercial software.

The project concludes with the preparation of the foundation blueprints that will support the new machinery and complement the rolling mill used in NOVACERO plant. The equipment will consist of a cooling system or galloping cooling table for billets and a billet hot load table system.

## **CAPITULO I**

### **ANTECEDENTES Y GENERALIDADES**

#### **1.1 INTRODUCCIÓN**

Desde el inicio de las civilizaciones el hombre se ha visto en la necesidad de construir bases firmes y estables para poder asentar las estructuras que hasta hoy en día son iconos importantes y fundamentales en los pueblos en desarrollo. A estas bases se las conoce como cimentaciones, mediante las que podemos transferir todas las fuerzas estáticas de las estructuras hacia ella y al suelo de cimentación. Sin embargo, gracias al avance de las industrias del sector siderúrgico, las fuerzas que transfiere no son solamente estáticas, sino que nos encontramos con fuerzas dinámicas más complejas generadas por los equipos como son compresores, pistones, motores, turbinas, etc., que requieren de nuevas metodologías para su estudio.

Las cimentaciones para las estructuras o equipos estáticos son resueltas aplicando una metodología convencional a través del cumplimiento de los estados límites de falla y de servicio, para lo cual será necesario conocer las propiedades del suelo de apoyo.

En cambio, para las cimentaciones de los equipos dinámicos además de su peso propio, se debe considerar las fuerzas dinámicas producto de su operación, las cuales nos generan esfuerzos y deformaciones ocasionadas por las vibraciones que sin un adecuado diseño de su cimentación podría causar daños significativos al funcionamiento de la máquina y acortar su vida útil. En vista de lo descrito anteriormente, para este presente trabajo tendremos que proponer un procedimiento de cálculo para solucionar el diseño de las cimentaciones de cargas dinámicas cíclicas, generadas por las máquinas a través del método conocido como “semiespacio” el cual toma en cuenta la rigidez del suelo de desplante, además incluye la fuerzas inerciales producidas por el bloque de concreto y la información sobre la máquina (velocidad de operación, fuerzas dinámicas, peso propio) que permiten completar las ecuaciones de comportamiento del sistema suelo-cimentación-máquina y llegar a una solución concreta.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo General**

- Realizar el diseño de la cimentación de un sistema de enfriamiento y mesa de carga en caliente para materia prima de acero (Palanquilla) proveniente del horno y transportada a través de un camino de rodillos hacia su disposición final.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Recopilar información sobre el diseño de cimentaciones indicado en la norma NEC-2015 y normas internacionales como el ACI 351 relacionadas con el tema objeto de estudio.
- Proceder a la revisión de las características y propiedades dinámicas del suelo del proyecto en estudio.
- Realizar la recopilación de información inherente al proyecto sobre equipos de carga dinámica.
- Realizar un estudio detallado de las metodologías existentes en la literatura y obtener los parámetros necesarios para el diseño de la cimentación de los equipos y máquinas utilizados en este sistema.
- Realizar un modelo matemático del diseño de la cimentación con las cargas dinámicas que intervienen.
- Verificación del modelo informático previamente elaborado mediante un software comercial.

## **1.3 ANTECEDENTES**

Uno de los elementos importantes dentro de cualquier proyecto de construcción son las cimentaciones, ya que a través de estas todas las estructuras transmiten sus cargas hacia ellas, mismas que posteriormente las transfieren al suelo de desplante. Sin embargo, en la actualidad dentro de las industrias los procesos de fabricación se han tornado más automáticos utilizando maquinarias para su ejecución; debido a todo esto se debe comparar parámetros complementarios para el diseño de las cimentaciones ya que se trata de máquinas industriales las cuales nos generan cargas dinámicas desbalanceadas de manera que es obligatorio realizar nuevas metodologías para alcanzar el diseño óptimo de este tipo de cimentaciones.

## **1.4 ASPECTOS GENERALES DEL PROYECTO**

### **1.4.1 Descripción del Proyecto**

La empresa NOVACERO S.A cuenta con la Planta Lasso ubicada en la Panamericana Norte a 15 km de Ciudad de Latacunga, perteneciente a la parroquia Lasso, provincia de Cotopaxi; al ser uno de los mayores productores de elementos de acero en el país y cumpliendo con normas de calidad, constantemente requieren de mejoras y ampliaciones en su planta por lo cual el objetivo de este estudio es el diseño de la cimentación de un sistema de enfriamiento y una mesa de carga en caliente de materia prima (Palanquilla) de la parte de acería y del nuevo tren de laminación.

### **1.4.2 Uso de las máquinas del sistema de enfriamiento y mesa de carga en caliente para palanquilla**

El equipo que será puesto en funcionamiento una vez culminadas las obras civiles será utilizado para el transporte y manejo de la Palanquilla que es el elemento más importante dentro de la empresa; mediante el cual fabrican todos sus productos como es: el laminado de varillas, el trefilado de perfiles y ángulos, alambrón, entre los más destacados. Para analizar las particularidades de funcionamiento de las máquinas primero vamos a identificar cada uno de los sistemas que se involucran en este proyecto como son el sistema de enfriamiento y la mesa de carga en caliente.

#### **1.4.2.1 *Sistema de enfriamiento***

Es un sistema en el cual se utiliza máquinas rotatorias como reciprocantes para realizar el transporte del producto que sale del camino de rodillos y se encuentra a grandes temperaturas, el cual se enfría en la mesa colocándole en el ambiente para su enfriamiento.

#### **1.4.2.2 *Carga en Caliente***

El calentamiento consiste en introducir la palanquilla de acero en un horno (denominado foso de termodifusión) para calentar hasta alcanzar temperaturas de 900 a 1250 °C, donde se presenta el máximo estado de plasticidad para así facilitar el trabajo del proceso de estiramiento y deformación de la palanquilla. Para este proceso también se utiliza máquinas rotatorias y reciprocantes. La mesa consta de una estructura de acero, cadenas que transportan

hasta un mecanismo que coloca la palanquilla sobre un camino de rodillos integrado a la estructura de la mesa. (CHAGCHA GUERRERO & VEGA RAZA, 2014)

## CAPITULO II

### RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

#### 2.1 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS EQUIPOS

La presente Especificación Técnica 201712131 se refiere al diseño, fabricación y suministro de la modificación de la descarga para la máquina de colada continua de palanquillas establecida en la Planta NOVACERO. Se proveerá también la instalación de un sistema de carga en caliente con palanquillas de longitud máxima de 12 m. Las modificaciones y los equipos necesarios están listados y descritos en la presente especificación técnica.

Las máquinas contarán con la más moderna tecnología y serán fabricadas con la mayor precisión requerida en este tipo de equipos; todos los conjuntos serán diseñados específicamente para sus necesidades particulares para lograr un manejo óptimo de las palanquillas; como se observa en las figuras 1 y 2.

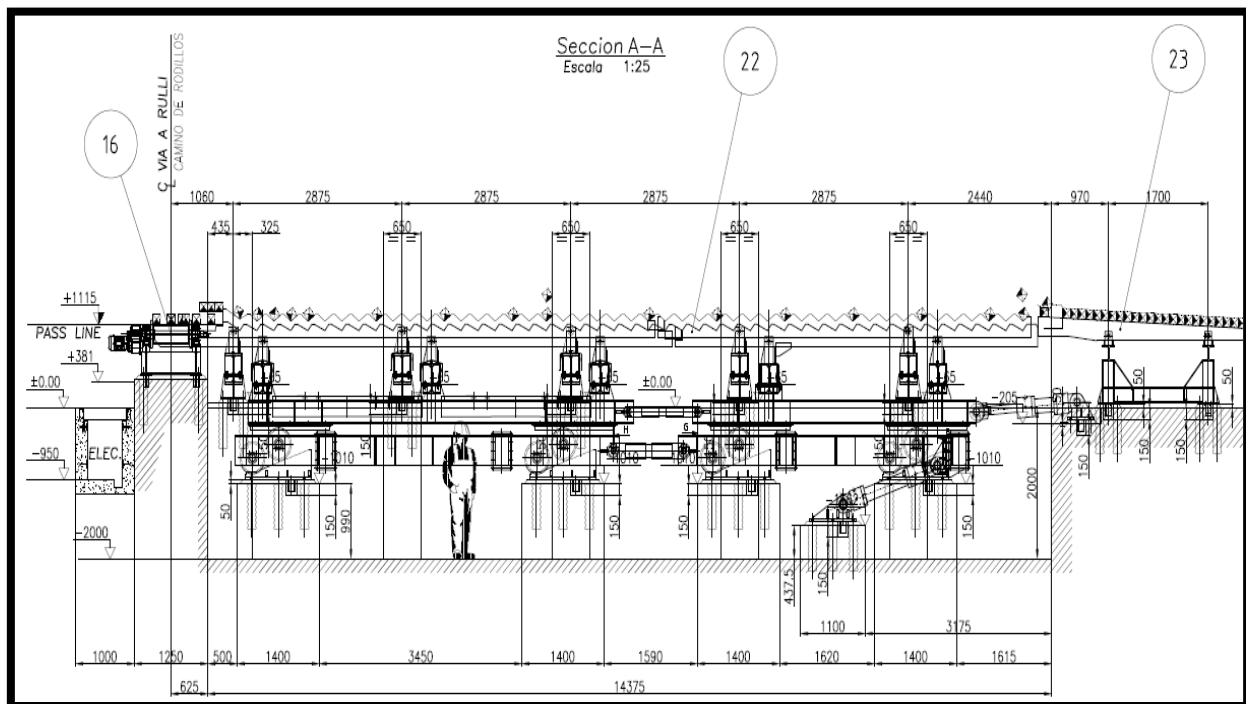
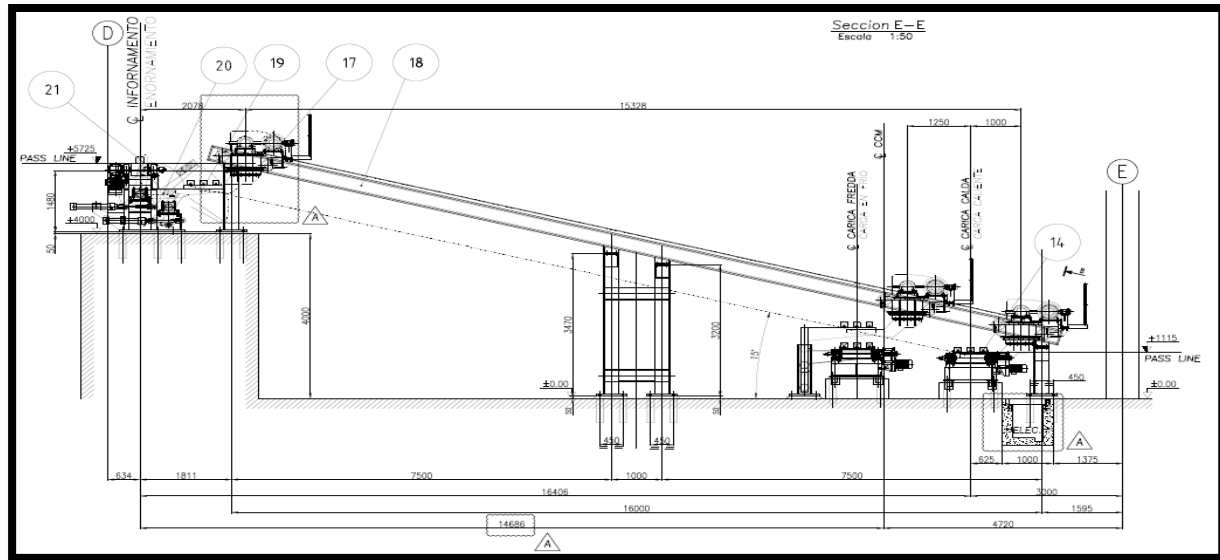


Figura 1 Sección Transversal del Sistema de Enfriamiento o Mesa de Enfriamiento Galopante de  
Fuente: Empresa NOVACERO S.A. Planta Lasso



**Fuente: Empresa NOVACERO S.A. Planta Lasso**

## 2.2 NORMAS (NEC 2015 E INTERNACIONALES)

Dentro de este proyecto para poder considerar el diseño más óptimo para la cimentación de las máquinas de la empresa utilizaremos como parámetros fundamentales las indicaciones propuestas por la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC 2015); en vista que las cargas a las que se somete la cimentación son de tipo dinámicas se hace necesario utilizar otras normas internacionales para poder complementar nuestra metodología para nuestro estudio como es la norma ACI-351-3R-04 la cual se centra específicamente en cimentaciones para máquinas contemplando factores como la frecuencia, amplitudes y resonancias.

En el transcurso de la ejecución del presente proyecto se considerará toda la normativa y lineamientos que dicta la norma (NEC-SE-CM 2015) referente al subcapítulo de exploración por sondeos para la recolección de información del estudio de suelos dando un mínimo de números de perforaciones y profundidades para su análisis, así como también otras características y procedimientos básicos dentro de un buen estudio de suelos y diseño de cimentaciones superficiales.

Con la ayuda de normas internacionales como la ACI-351-3R-04 se establecerá las consecuencias de las vibraciones producidas por las máquinas en funcionamiento sobre estructuras vecinas y humanos; a través de valores límites que se encuentran graficados y que fueron

elaborados como una guía para estimar el comportamiento del conjunto máquina-cimentación-suelo de una forma satisfactoria.

### **2.3 METODOLOGÍA DE DISEÑO**

El diseño de cimentaciones para máquinas industriales es un problema sumamente complejo, debido a que es inevitable enfrentar parámetros como las fuerzas dinámicas, así como sus vibraciones oscilatorias y periódicas que no son muy comunes en el diseño de cimentaciones realizadas por un ingeniero civil ya que por lo general más se emplea cargas estáticas. Por tal motivo es necesario adoptar una metodología más racional, la cual añade los estudios realizados por Lysmer (1965) de manera que muestra una representación del suelo como un semiespacio elástico utilizando conceptos de rigidez, amortiguamiento del suelo, disipación de energía mediante el amortiguamiento geométrico y calculando las amplitudes de vibración aplicadas a las frecuencias tanto de la máquina como naturales de la relación suelo-cimentación y al mismo tiempo procurando evitar una resonancia del sistema para contrarrestar daños perjudiciales a la subestructura (Dobry, Gazetas, & Stokoe, Dynamic Response of Arbitrarily Shaped Foundations: Experimental Verification, 1985).

Aunque este método era muy preciso y aceptable la determinación de parámetros como la rigidez y amortiguamiento se tornaban muy complejos de establecer, por tales motivos los investigadores Dobry y Gazetas a inicios de la década de los 80's presentaron un método simplificado mediante cartas y ecuaciones obtenidas a partir de estudios teóricos y experimentales para la determinación de los coeficientes de rigidez y amortiguamiento del sistema de cimentación, factores que relacionan los seis modos principales de vibración del sistema con la frecuencia de excitación (Dobry & Gazetas, Dynamic Response of Arbitrarily Shaped Machine, 1986).

### **2.4 ESTUDIOS DE SUELO**

Se contrató a la empresa consultora INGEOPAV (Ingeniería Civil, Geotecnia y Pavimento), para realizar el estudio de suelos, en el lugar donde se planifica la construcción de un sistema de enfriamiento y mesa de carga en caliente para materia prima de acero (Palanquilla); ubicado en la planta de producción NOVACERO, de la ciudad de Lasso, provincia de Cotopaxi; con el fin de obtener datos de la capacidad de carga del suelo de fundación, para el diseño de su cimentación y estabilidad de las excavaciones.



El estudio se fundamenta en la ejecución de una exploración semi-directa en base a lo que estipula la norma para construcciones que se clasifican en la categoría de bajas que es considerada para construcciones de hasta 3 niveles y cargas máximas de servicio inferiores a 800 kN estipulada en la norma NEC. La exploración consistente en tres perforaciones con ensayo de penetración estándar (SPT) de 6 metros de profundidad y recuperación de muestras referida a la tabla 1; aplicación de las teorías de mecánica de suelos para la interpretación, cota de fundación y capacidad admisible de carga.

*Tabla 1 Categoría de la Unidad de Construcción*

CATEGORÍA DE LA UNIDAD DE CONSTRUCCIÓN (Véase en la sección 2.5)			
Baja	Media	Alta	Especial
Profundidad Mínima de sondeos: 6 m.	Profundidad Mínima de sondeos: 15 m.	Profundidad Mínima de sondeos: 25 m.	Profundidad Mínima de sondeos: 30 m.
Número mínimo de sondeos: 3	Número mínimo de sondeos: 4	Número mínimo de sondeos: 4	Número mínimo de sondeos: 5

**Fuente: NEC-SE-CM 2015**

#### 2.4.1 ENTORNO Y PROYECTO

La zona donde se planifica la construcción está caracterizada por tener una topografía relativamente plana, probablemente por encontrarse dentro de una planta de producción que ha sido concebida de tal manera. Dentro de la planta se observan construcciones de baja y mediana altura, que a simple vista no reportan problemas causados por las condiciones del suelo de cimentación; sin embargo, por la presencia de aguas subterráneas y el entorno del proyecto, las precauciones serían necesarias, definiendo al subsuelo de mediana complejidad.

Los parámetros geotécnicos obtenidos del proyecto en estudio se resumen en la tabla 2:

*Tabla 2 Parámetros Geotécnicos*

NIVEL DE AGUA SUBTERRÁNEAS:	Entre 3.00 y 5.50 m.
PROFUNDIDAD DE CIMENTACIÓN:	2.00 m
CAPACIDAD DE CARGA ADMISIBLE:	19.00 t/m <sup>2</sup>
COEFICIENTE DE BALASTO: Depende también de las cargas y geometría de la cimentación	Variable entre 1.02 a 1.71 kg/cm <sup>3</sup>
CLASIFICACIÓN DE SUELOS NEC:	Tipo "D"
CLASIFICACIÓN DE SUELOS SUCS:	SM/GM
ACELERACION MAXIMA "Z". FUNCIÓN DE LA ZONA SISMICA ADOPTADA:	0.4 g
TALUDES DE EXCAVACIÓN:	1 V : 1.25 H (tomar precauciones indicadas)
PARAMETROS DE ENPUJE DE TIERRA	$\gamma = 1.80 \text{ t/m}^3$ $\phi = 36^\circ$

**Fuente: Empresa IGEOPAV**

## **CAPITULO III**

### **FUNDAMENTOS TEORICOS**

#### **3.1 TIPOS DE EQUIPOS DINÁMICOS**

Según Sebastián López (2010) nos explica que primeramente una máquina no es otra cosa que un conjunto de piezas o elementos móviles o fijos, cuyo funcionamiento principal es aprovechar, dirigir, regular o transformar energía o realizar un trabajo.

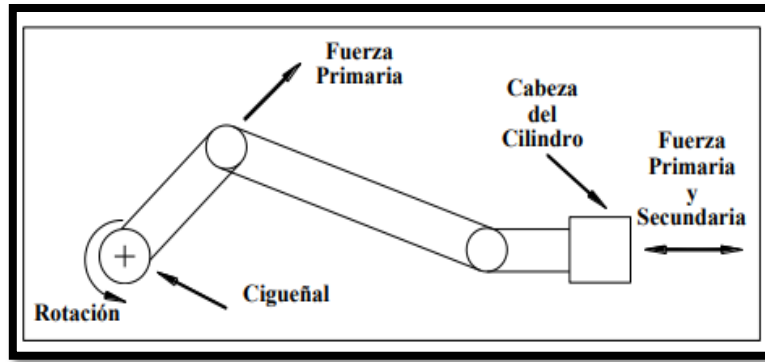
Juárez Alvarado (1998) menciona que existen muchos tipos de máquinas y cada uno puede requerir un cierto tipo de cimentación. Se describen a continuación los diferentes tipos de maquinaria y sus características especiales.

Los diferentes tipos de maquinarias son excitados normalmente por cargas desbalanceadas; en general, pueden clasificarse dentro de las siguientes categorías: (JUÁRES ALVARADO, 1998)

- a. Máquinas Reciprocantes
- b. Máquinas Rotatorias
- c. Máquinas de Impacto

##### **3.1.1 MÁQUINAS RECIPROCANTES**

Son probablemente las máquinas más antiguamente usadas y es un ejemplo clásico del mecanismo de manivela, el cual se usa para convertir un movimiento translatorio en un movimiento rotatorio y viceversa como se observa en la figura 3. Estas máquinas pueden consistir en un cilindro simple y un pistón, con una acción simple o con doble acción; también pueden ser de múltiples cilindros, con pistones operando en un patrón regular y montados en una manivela común. La velocidad de operación de este tipo de máquinas es menor a 600 rev/min (RPM). (ANGOS TACO, 2009)

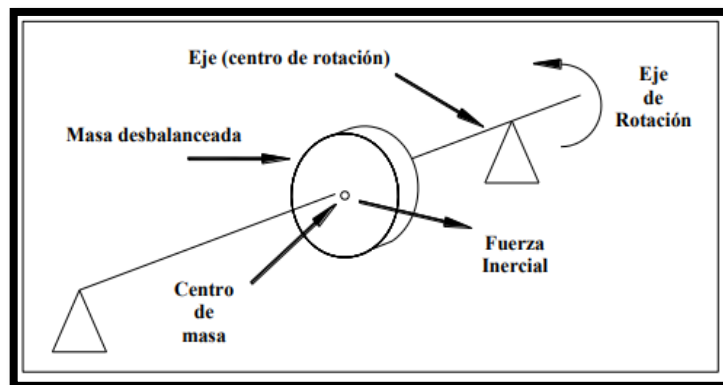


*Figura 3. Diagrama de Equipo Reciproco*  
**Fuente: Angos Taco, 2009**

Muchas de estas máquinas utilizan la fuerza de fluidos en los cilindros de pistones que actúan en la cabeza del cilindro y en el interior del cigüeñal (Figura 1). Por lo general en cilindros de armazón rígido, esta fuerza está internamente balanceada, pero en grandes máquinas una parte de esta fuerza es transmitida a la cimentación, por lo que es inapropiado y poco conservador asumir que la armadura del compresor y cilindro son suficientes para internamente balancear toda la fuerza (ANGOS TACO, 2009).

### 3.1.2 MÁQUINAS ROTATORIAS

Estas máquinas están compuestas en su totalidad por elementos giratorios alrededor de sus propios ejes como se aprecia en la figura 4. Las vibraciones son producidas como consecuencias del deslizamiento natural existente entre el eje de giro del rotor de la máquina y sus ejes principales de inercia. Estas máquinas operan a frecuencias que están por las 600 r.p.m (Angos Taco,2009).



*Figura 4. Diagrama de Equipo Giratorio*  
**Fuente: Angos Taco, 2009**

Las fuerzas dinámicas que produce este tipo de máquinas están en función del eje de masas, la velocidad de rotación y la magnitud del deslizamiento. El desplazamiento debería ser menor a las condiciones de construcción cuando el equipo está bien equilibrado o balanceado, y sin desgaste o corrosión; sin embargo, en la obra es muy complicado llegar a condiciones de equilibrio y balanceo de los ejes por causa de varios aspectos como son el deslizamiento durante la instalación o las deflexiones por gravedad del eje de rotación de la máquina. Los cambios en el alineamiento, operación próxima a la resonancia, y otras condiciones indeseables pueden grandemente incrementar la fuerza aplicada al rotor. La operación del Equipo normalmente llega hasta los límites de vibración permitidos, por lo cual la acción dinámica en la cimentación resulta muy importante (ANGOS TACO, 2009).

Las máquinas rotatorias en base a su velocidad de operación pueden clasificarse como:

- De baja velocidad las mismas que operan a menos de 1500 RPM como pueden ser motores generadores, bombas centrifugas, ventiladores, etc.
- De alta velocidad que generalmente operan entre 3000 RPM hasta 10000 RPM, las más conocidas son turboventiladores, compresores de gasolina y turbinas que funcionan a 1500 y 1800 RPM (Flores Gomez, 2012).

### **3.1.3 MÁQUINAS DE IMPACTO**

Este tipo de máquinas se caracteriza por la producción de fuertes impactos sobre la cimentación durante su funcionamiento, por lo que en la evaluación de sus efectos se consideran algunas propiedades de disipación y absorción de energía. La carga dinámica es intermitente (SALAZAR CONTRERAS, 2013).

La característica principal a considerar en este tipo de maquinaria es que su acción sobre la cimentación, puede considerarse como cargas singulares, ya que su efecto termina antes de que suceda la siguiente carga, lo que provoca vibraciones de tipo transitorias. Es necesario conocer la información de la cantidad de fuerza ejercida y en que lapso de tiempo es aplicada, para poder evaluar la respuesta de la cimentación sujeta a este tipo de esfuerzos.

Por otra parte, basándose en sus frecuencias de operación, la maquinaria también puede ser dividida dentro de tres categorías: (Varanasi Rama, pág. 4)

- Grupo 1.- Frecuencias de baja a medias, con valores de 0-500 r.p.m.
- Grupo 2.- Frecuencias de medias a altas, con valores de 500-1000 r.p.m.
- Grupo 3.- Frecuencias muy altas con valores mayores que 1000 r.p.m.

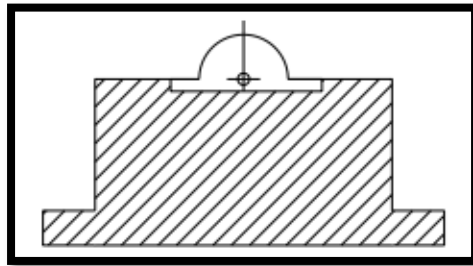
### 3.2 TIPO DE CIMENTACIONES ESPECIALES PARA EQUIPOS DINÁMICOS

En vista que las normas NEC 2015 no cuentan con información suficiente sobre cimentaciones de máquinas se requiere de normas internacionales para su clasificación. Atendiendo a su rigidez, las estructuras de cimentación para maquinarias se pueden clasificar en cuatro tipos:

- a) Cimentación Tipo Bloque
- b) Cimentación Tipo Caja
- c) Cimentación Tipo Muro
- d) Cimentación Tipo Pórtico

#### 3.2.1 CIMENTACIONES TIPO BLOQUE

Consiste en un bloque macizo o con huecos generalmente de hormigón reforzado que soporta a la máquina en su parte superior como se visualiza en la figura 5. Para fines de análisis puede ser considerado como un cuerpo rígido. Este tipo de cimentaciones es utilizado para máquinas reciprocantes y para máquinas rotatorias de bajas frecuencias (LÓPEZ MORENO, 2010).



*Figura 5. Cimentación tipo bloque.*

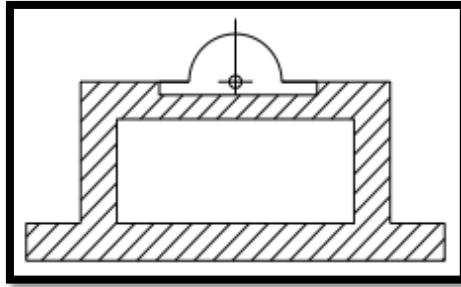
**Fuente: López Moreno, 2010**

Para este tipo de cimentaciones se recomienda que se localicen cerca de la rasante para reducir las fuerzas dinámicas, el centro de gravedad del sistema de la máquina-cimentación y diferencias de elevación entre el equipo con el objetivo de conseguir el centro de masas cercano a la rasante.

Generalmente se emplea el bloque a manera de una estructura rígida la cual depende de varios factores como la calidad del suelo, la masa, las dimensiones, características del suelo y la respuesta dinámica producto de las cargas generadas por la máquina.

### 3.2.2 CIMENTACIONES TIPO CAJA

Consiste en un bloque hueco de hormigón armado que soporta a la máquina en su parte superior como se presenta en la figura 6. Usualmente utilizada en máquinas rotatorias de altas frecuencias (LÓPEZ MORENO, 2010).



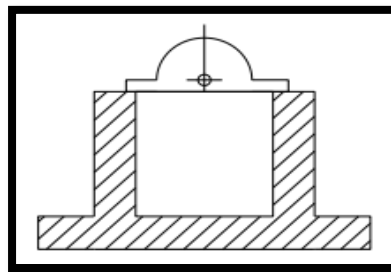
*Figura 6. Cimentación tipo caja.*

**Fuente: López Moreno, 2010**

La ejecución de este tipo de cimentaciones es muy dificultosa no solo por su diseño, sino más apropiadamente por su construcción ya que representa un mayor costo debido a que se tendría que desperdiciar el encofrado que se quedaría en el interior del bloque. (SALAZAR CONTRERAS, 2013)

### 3.2.3 CIMENTACIONES TIPO MURO

Consiste en un par de muros de hormigón armado que aloja a la máquina en su parte superior como se observa en la figura 7. Utilizada para turbo-máquinas ya que necesita espacio entre muros para colocar los equipos auxiliares necesarios (LÓPEZ MORENO, 2010).



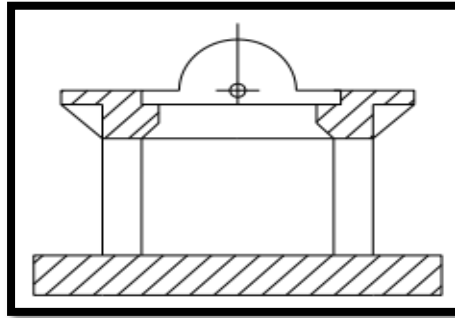
*Figura 7. Cimentación tipo muro.*

**Fuente: López Moreno, 2010**

### 3.2.4 CIMENTACIONES TIPO PÓRTICO

En general, una cimentación de este tipo está formada por una pesada losa de cimentación apoyada en el terreno o en pilotes, en la cual se apoyan una serie de columnas. Las columnas están

unidas en sus extremos superiores por vigas transversales y longitudinales formando pórticos en ambas direcciones como se aprecia en la figura 8. Las vigas son las que soportan los componentes vibratorios principales en tanto que el espacio entre las columnas resguarda el equipo auxiliar. Utilizadas en máquinas de impacto que trabajan a altas velocidades y también por máquinas rotatorias de baja frecuencia (LÓPEZ MORENO, 2010).



*Figura 8. Cimentación tipo pórtico.*  
**Fuente: López Moreno, 2010**

## **CAPITULO VI**

### **ESTUDIO DE LAS MÁQUINAS Y TIPO DE CIMENTACIÓN A UTILIZAR EN EL PROYECTO.**

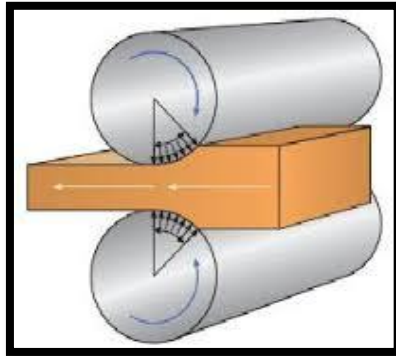
#### **4.1 CATEGORÍA DE EQUIPOS UTILIZADOS EN LA PLANTA “NOVACERO”**

En esta parte del escrito se dará una breve explicación sobre los diferentes equipos que generalmente se ocupará en la empresa de producción de NOVACERO en la Planta Lasso para lograr que la materia prima (PALANQUILLA) se transforme en un producto terminado. Entre los más importantes se desglosa a continuación (figura 9) el funcionamiento de los equipos que intervienen en un tren de laminación incluyendo los equipos para los cuales se está realizando el diseño de la cimentación de este proyecto que son el sistema de enfriamiento (Mesa de enfriamiento Galopante) y de la mesa o sistema de carga en caliente de la palanquilla.





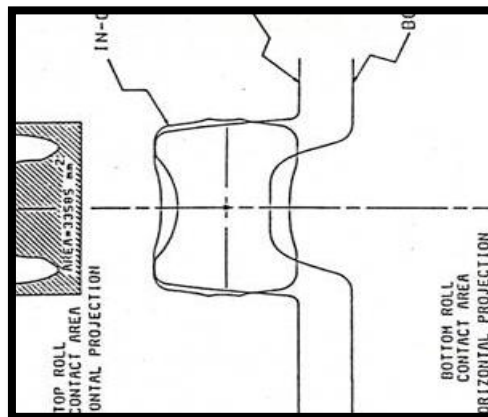
- 2) **DESBASTE.** En este stand de laminación, se realiza la mayor de las reducciones de la palanquilla, obteniendo barras de menor sección. Máquina constituida por motor, reductor, caja de piñones y caseta de laminación las cuales entran en la categoría de máquinas reciprocantes y rotatorias trabajando en conjunto (figura 11).



*Figura 11 Stand de Desbaste*

**Fuente: Empresa NOVACERO S.A. Planta Lasso**

- 3) **CANTEADOR.** Este stand de laminación se usa para reducir el área de la barra lateralmente (figura 12). Por ejemplo, recibe una barra en forma de ovalo y la transforma en barra redonda. Estructurado en forma similar al desbaste la diferencia es que los cilindros se montan en posición vertical.



*Figura 12 Stand de Canteado*

**Fuente: Empresa NOVACERO S.A. Planta Lasso**

**Desde la 4) Hasta la 8)** Se tiene el tren continuo como tal, constituido de varios stands de laminación, en donde la barra va tomando diferentes formas y reduciendo su área, así como extendiendo su longitud. Constituidos de los mismos elementos o partes que se indican en el desbaste.

- 9) En este stand de laminación es donde se da la formación final de los perfiles como los Ángulos 100-75 y 65 x 6-9-12 (figura 13). La barra llega hasta una longitud de 18 metros.



*Figura 13 Ángulos laminados*

**Fuente: Empresa NOVACERO S.A. Planta Lasso**

Todos estos stands de laminación están constituidos por motores, reductores y cajas de piñones, además de ello siempre se tendrá casetas de repuesto para cada stand, en este caso serían las denominadas Morgan 350 y Morgan 400, esto nos permite ganar tiempo en los cambios.

- 10) **Cizalla Volante.** En esta máquina es en donde el perfil terminado se corta a 6 metros que es la longitud comercial. Esta máquina es movida por un motor eléctrico y es considerada una máquina de impacto (Figura 14).



*Figura 14 Máquina de Cizalla Volante*

**Fuente: Empresa NOVACERO S.A. Planta Lasso**

- 11) **Enderezadora.** Los perfiles una vez laminados no están totalmente rectos por cuanto se hace necesaria el uso de una máquina llamada enderezadora que como su nombre lo indica elimina defectos como la flexión (o torcedura) del ángulo. Esta máquina está compuesta por una serie de rodillos (ocho en total) con la forma de los perfiles a enderezarse, de la misma manera que el resto de equipos se mueve con un motor eléctrico.

Estos se los empaquetan y envía hasta la bodega para el despacho al cliente como se observa en la figura 15.



*Figura 15 Perfiles Enderezados*

**Fuente: Empresa NOVACERO S.A. Planta Lasso**

Este es un proceso continuo que se resume en la figura 9, en donde el flujo de la barra parte desde el horno, se dirige hasta el desbaste, pasa al cateador luego a los stands Morgan y terminan en el corte y enderezado listo para ser empacado el producto terminado. Pero dentro de su producción hay momentos en los cuales los operarios necesitan que la palanquilla excedente sea transportada a una mesa de enfriamiento para un futuro proceso.

**12) Mesa de enfriamiento.** En esta máquina la palanquilla proveniente de la colada continua con ayuda de un camino de rodillos es colocada a temperatura ambiente para enfriarlas y ser utilizadas en una próxima ocasión. La máquina consta de dos estructuras una mesa fija conformada por un entramado de perfiles y una mesa móvil que emplea cuatro pistones hidráulicos para el levantamiento y deslizamiento de las palanquillas. Lo que nos indica que estamos frente a un equipo reciprocante. Como dato adicional este mecanismo será construido a futuro y se la puede visualizar en la figura 1.

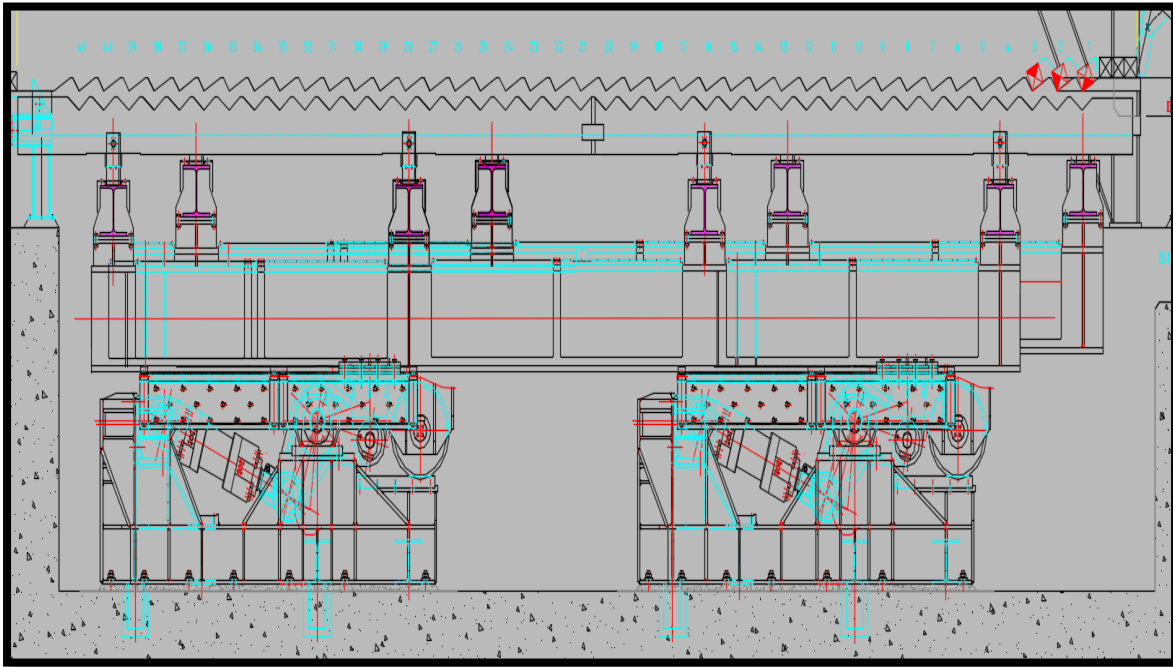
**13) Sistema de Carga en Caliente.** Este mecanismo será construido para poder transportar la palanquilla caliente que sale de la colada continua de un determinado nivel hasta el horno de recalentamiento para su posterior proceso productivo como lo observamos en el tren 2 de laminación.

#### **4.1.2 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LAS MÁQUINAS**

Como se mencionó anteriormente este proyecto se enfocará netamente en el sistema de carga en caliente y mesa de enfriamiento de palanquillas por tal motivo para sus especificaciones técnicas nos centraremos solamente en estas dos máquinas.

#### 4.1.2.1 **MESA DE ENFRIAMIENTO GALOPANTE**

Cantidad: ..... Una (figura 16)



*Figura 16 Mesa de Enfriamiento Galopante*  
**Fuente: Empresa SIDERTECH S.A.**

##### **- Función:**

Recepción de las palanquillas cortadas del puente transferidor y cargarlas sobre los peines de forma automática.

Dar vuelta 90° a las palanquillas individualmente y continuamente para asegurar el enfriamiento uniforme y minimizar la deformación de las palanquillas debida al enfriamiento irregular de las caras.

Entregar las palanquillas enfriadas a la mesa de almacenamiento.

Tipo de la mesa de enfriamiento: ..... Giro continuo (solera galopante)

Dimensiones preliminares de la mesa: ..... 11 m x 13 m

Longitud de la mesa en la zona de giro de las palanquillas: ..... 11 200 mm

Número de muescas: ..... 41

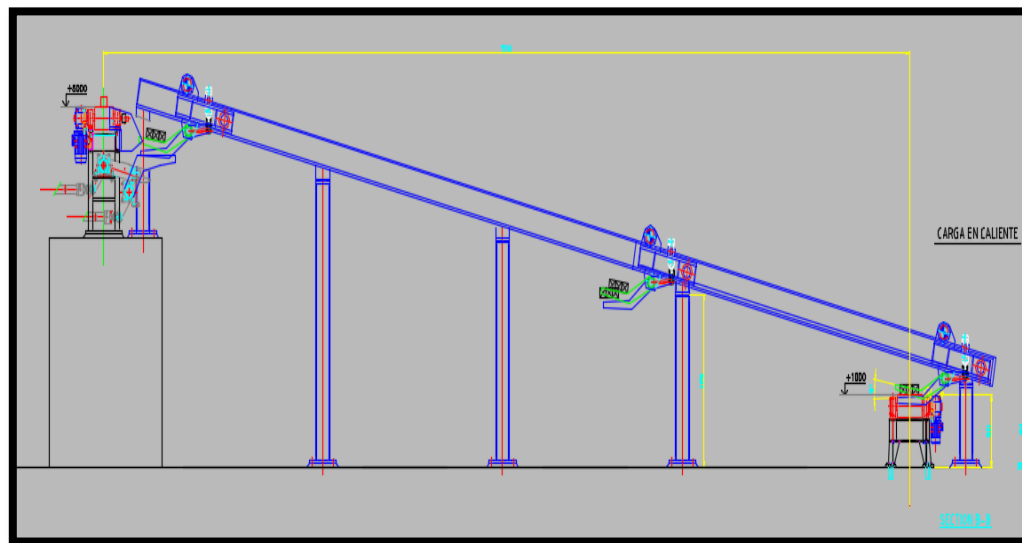
Paso entre muescas: ..... aprox. 280 mm

Longitud máxima de la palanquilla: ..... 12 000 mm (una hilera)

Longitud mínima de la palanquilla: .....6000 mm (en dos hileras)  
Temperatura de la palanquilla al final de la zona de giro: .....aprox. 450°C  
Actuación: ..... por cilindros hidráulicos.

#### 4.1.2.2 **SISTEMA DE CARGA EN CALIENTE**

**Cantidad**..... Una (figura 17)



*Figura 17 Instalación General*  
**Fuente: Empresa SIDERTECH S.A.**

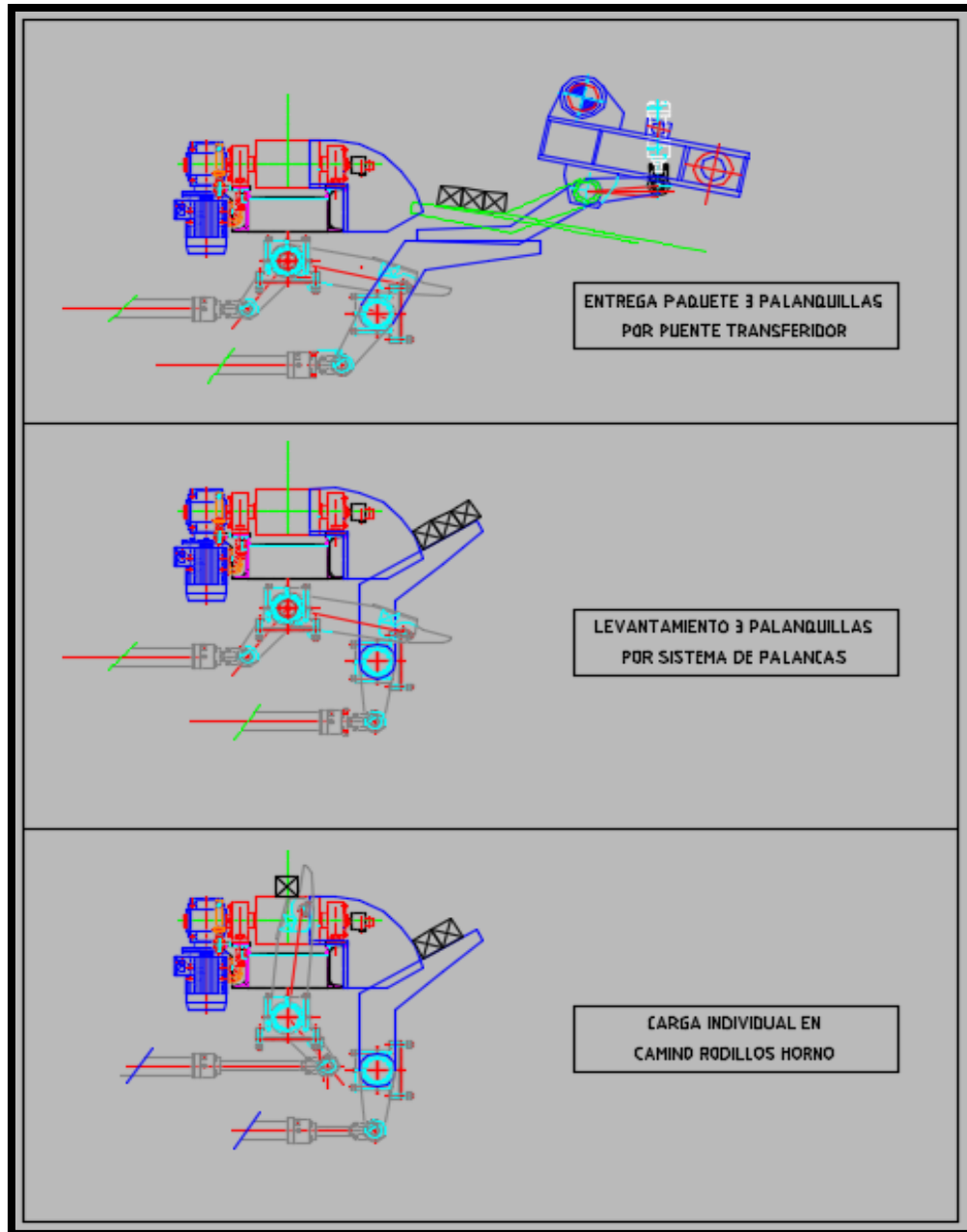
#### - **Función:**

Transferencia de las palanquillas a la porción inicial de la mesa de carga horno de recalentamiento.

#### - **Diseño:**

Puente Transferidor con palanca de elevación paquete de palanquillas de longitud hasta 12 m que cruza entre el camino de rodillos y la mesa de carga horno recorriendo sobre dos (2) rieles, accionado mediante piñón y cremallera en cada extremo.

El sistema trabaja según los conceptos indicados en la figura 18:



*Figura 18 Sistema de funcionamiento en Horno*

**Fuente: Empresa SIDERTECH S.A.**

#### 4.1.3 UBICACIÓN EN PLANTA DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO Y DE LA MESA DE CARGA EN CALIENTE.

El proyecto se encuentra ubicado en el lado derecho de la vía Panamericana Sur en sentido Quito-Latacunga, dentro y hacia el suroeste de la planta de producción de NOVACERO en la ciudad de Lasso, provincia de Cotopaxi (figura 19); con las siguientes coordenadas geográficas:

(Sistema de enfriamiento) → Latitud:  $0^{\circ}47'36.47''$  S; Longitud:  $78^{\circ}36'58.49''$  O (UTM PSAD 56)

(Mesa de Carga en Caliente) → Latitud:  $0^{\circ}47'36.05''$  S; Longitud:  $78^{\circ}36'57.91''$  O (UTM PSAD 56)



*Figura 19 Ubicación de Proyecto en Planta*

**Fuente: Google Earth Pro**

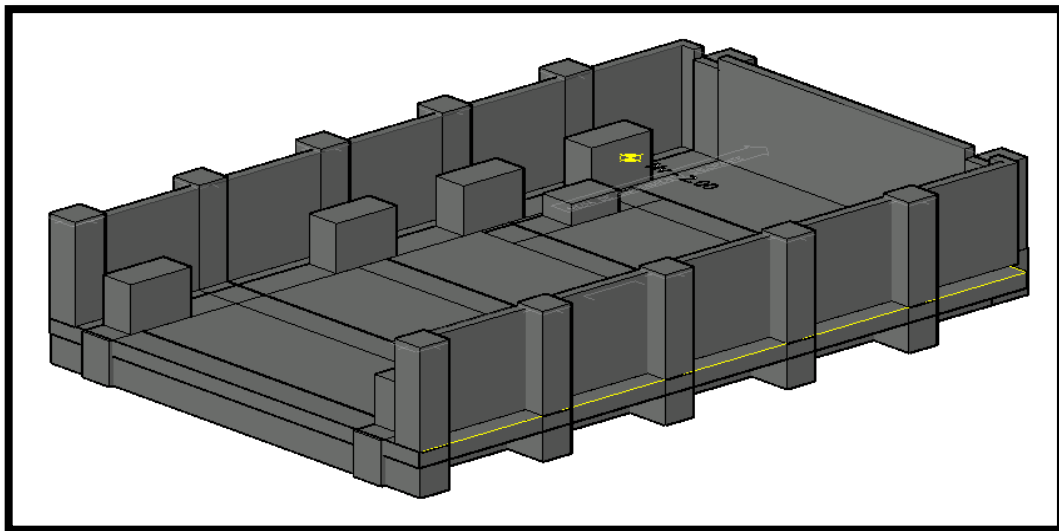


## 4.2 SELECCIÓN DEL TIPO DE CIMENTACIÓN

Con la teoría investigada de los capítulos anteriores y la información entregada por la empresa sobre las especificaciones técnicas a detalle de la maquinaria que va a implementarse dentro de este proyecto, podremos seleccionar las cimentaciones que se ajusten de una mejor manera a los requerimientos y necesidades que exige el equipo para su correcto funcionamiento y de tal forma extender su vida útil dentro de la planta.

### 4.2.1 SISTEMA DE ENFRIAMIENTO (MESA DE ENFRIAMIENTO GALOPANTE)

Para este conjunto de maquinarias en vista de que requieren ser implantadas a un nivel de -2 m y que en la mayoría de sus equipos nos encontramos con máquinas reciprocantes (Pistones Hidráulicos), se optó por realizar cimentaciones tipo bloque los mismos que estarán sobre una losa de piso y reforzados mediante vigas de cimentación entre cruzadas como lo muestra la figura 20 en el siguiente esquema en 3D:



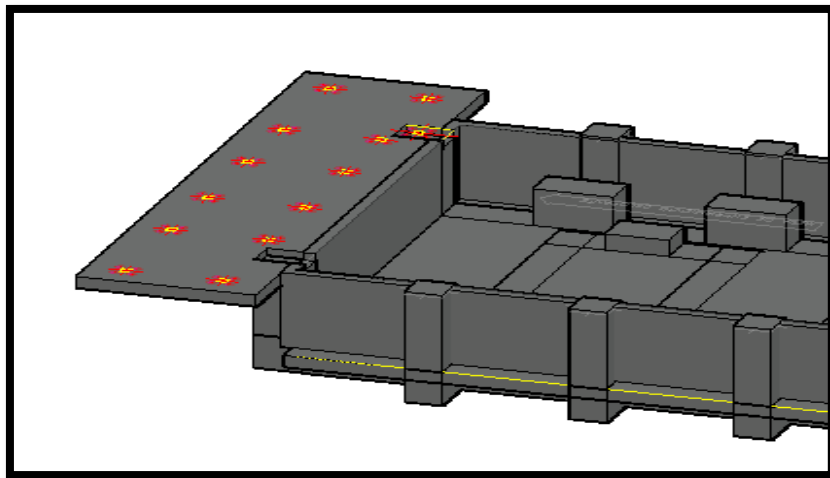
*Figura 20 Esquema de Cimentación para Sistema de Enfriamiento*

**Fuente: Autor**



#### **4.2.2 MESA DE ENFRIAMIENTO FINAL (COMPLEMENTO DE SISTEMA DE ENFRIAMIENTO)**

Esta mesa en un principio tenía un mecanismo galopante, pero por requerimientos de la empresa se modificó a una estructura metálica fija, con lo cual se decidió construir una losa de cimentación y debido a que las cargas en esta mesa no son muy grandes la losa será adosada a la cimentación vecina que es el sistema de enfriamiento, como se visualiza en la figura 21 en el siguiente esquema en 3D:



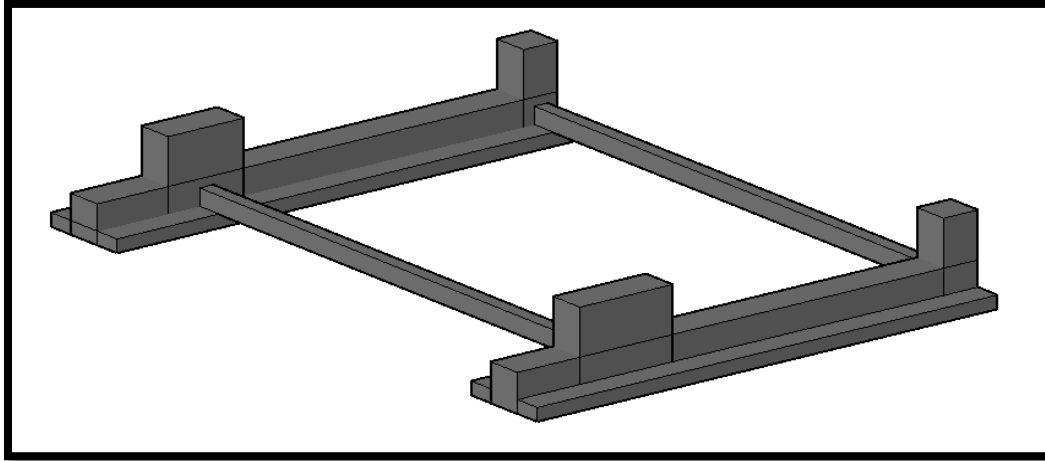
*Figura 21 Esquema de Losa para Mesa de enfriamiento final*

**Fuente: Autor**

#### **4.2.3 MESA DE CARGA EN CALIENTE (SISTEMA DE CARGA EN CALIENTE)**

Para el caso de este sistema nos encontramos con máquinas que constan de un transferidor a manera de un mecanismo móvil que se desplaza por rieles apoyadas en una estructura metálica de vigas y un brazo Hidráulico-mecánico, mediante el cual se eleva la palanquilla desde el camino de rodillos de la colada continua hacia el horno; el tipo de maquinaria utilizada es reciprocante y rotatoria, por lo cual se decidió construir cimentaciones tipo bloque enterradas en el suelo de desplante. Debido al momento concentrado que se genera en la base de la estructura por causa del mecanismo móvil, reforzaremos los bloque con zapatas corridas para contrarrestar el momento y

evitar el volteo de la estructura como se presenta en la figura 22 en el siguiente esquema en 3D:



*Figura 22 Esquema de Cimentación de Mesa de Carga en Caliente*

**Fuente: Autor**

## **CAPITULO V**

### **METODOLOGÍA DE DISEÑO DE LA CIMENTACIÓN PARA EL PROYECTO**

#### **5.1 ESTUDIO DEL MÉTODO DE DISEÑO PARA EL TIPO DE CIMENTACIÓN SELECCIONADA.**

Para poder comenzar con el estudio a profundidad del método para el diseño de las cimentaciones es necesario previamente tener bien claro y definido alguno de los conceptos básicos dentro de la dinámica adaptada a las cimentaciones de máquinas.

En general las fundaciones para máquinas son sometidas a fuerzas dinámicas las mismas que se identifican como cargas del tipo periódicas, este tipo de cargas pueden interpretarse por una función trigonométrica senoidal o cosenoidal. En este caso debido al tipo de maquinaria, se propuso la construcción de las cimentaciones tipo bloque permitiendo un análisis de seis grados de libertad. Para un mayor entendimiento a continuación se presentará una descripción de los parámetros de vibración:

### 5.1.1 DEFINICIONES

#### 5.1.1.1 *Vibración*

Según Álvarez (2015) la vibración es un movimiento periódico de un cuerpo o sistema que se desplaza desde una posición de equilibrio, que genera grandes frecuencias y puede generar fatiga o falla de materiales y separa el concepto de vibración con el de oscilación ya que nos dice que las oscilaciones son de una amplitud mayor.

#### 5.1.1.2 *Período*

Se considera que cuando un movimiento se repite en un mismo intervalo de tiempo se lo llamará periodo, se lo identifica como la inversa de la frecuencia y se mide en unidades de tiempo (segundos) como observamos en la ecuación 1:

$$T = \frac{1}{frecuencia} = \frac{1}{f} \text{ [s]} \quad \text{Ec.1}$$

#### 5.1.1.3 *Movimiento Periódico y no Periódico*

Es un movimiento de evolución temporal el cual si se repite en el mismo intervalo de tiempo es movimiento periódico, mientras que si no se repite en el intervalo de tiempo es un movimiento no periódico (Singiresu, 2012).

#### 5.1.1.4 *Ciclo*

Se refiere a un movimiento completado durante un periodo determinado.

#### 5.1.1.5 *Frecuencia*

Es una magnitud que mide el número de repeticiones o ciclos para un determinado tiempo de cualquier fenómeno o suceso periódico.

La frecuencia se calcula cuantificando el número de sucesos de este teniendo en cuenta un intervalo temporal, en otras palabras, es la inversa del periodo referenciada en la ecuación 2.

$$f = \frac{1}{Periodo} = \frac{1}{T} \quad \text{Ec. 2}$$

#### 5.1.1.6 *Frecuencia natural*

Cuando un determinado sistema oscilatorio vibra bajo la operación de fuerzas propias del sistema sin la acción de alguna fuerza externa se considera que es una frecuencia natural.

También puede ser definida como una frecuencia permanente dentro del sistema cuya magnitud depende del comportamiento inherente al sistema. Interpretada como ciclos por segundo de un sistema lineal en oscilación libre (Suresh C. Arya, Michael W. O'Neill, & George Pincus, 1984).

#### 5.1.1.7 ***Vibración Forzada***

Cuando en un sistema de varios grados de libertad actúan fuerzas externas periódicas o intermitentes, el sistema experimenta vibración forzada, como por ejemplo máquinas como motores, turbinas, etc. (Singiresu, 2012)

#### 5.1.1.8 ***Vibración Libre***

Al contrario de la vibración forzada, esta vibración ocurre cuando el movimiento se mantiene debido a fuerzas de restauración gravitacionales o elásticas, como por ejemplo el movimiento oscilatorio de un péndulo o la vibración de una varilla elástica (Montoya & Pinto Vega, 2010).

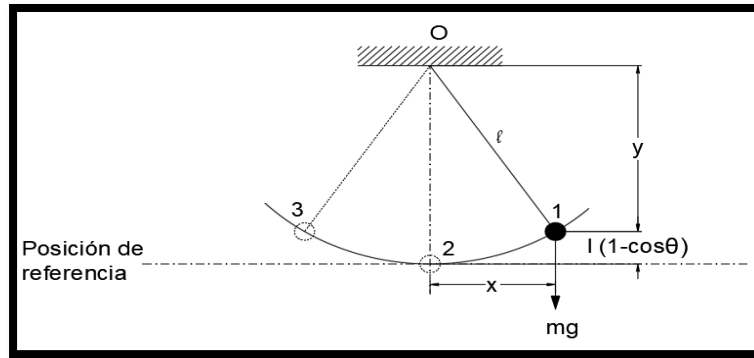
#### 5.1.1.9 ***Amplitud de Movimiento***

Se considera como una medida de la variación máxima del desplazamiento que puede alcanzar un cuerpo durante las vibraciones desde una posición en reposo. Este desplazamiento varía de forma periódica en el tiempo lo cual nos permite expresarlo como la distancia entre el punto más alejado de una onda y el punto de equilibrio o medio. (LIMAICO ÁLVAREZ, 2015)

#### 5.1.1.10 ***Grados de Libertad***

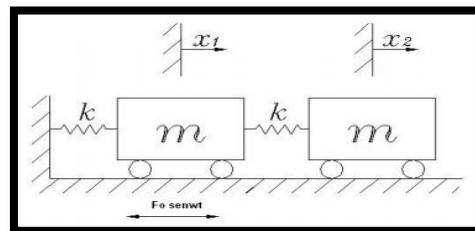
Los grados de libertad se define físicamente como el número de tipos de movimientos que pudiera tener un objeto en un sistema, la cantidad de grados de libertad del sistema se encuentra determinado por el mínimo de coordenadas independientes requeridas para delimitar por completo todas las partes de un sistema en cualquier instante de tiempo.

En la figura 23 se representa un sistema de un solo grado de libertad, se puede formular en función del ángulo ( $\theta$ ) o en función de las coordenadas cartesianas X Y (Singiresu, 2012).



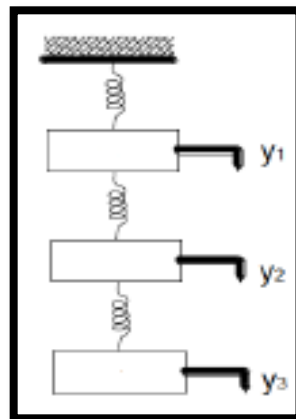
*Figura 23 Péndulo Simple*  
**Fuente: Singiresu 2012**

En la figura 24 se presenta un sistema de dos grados de libertad, ya que muestra un sistema de dos masas y dos resortes descrito por las dos coordenadas lineales  $x_1$  y  $x_2$ .



*Figura 24 Sistema de dos Grados de Libertad*  
**Fuente: Singiresu 2012**

En la figura 25 se presenta un sistema de tres grados de libertad, ya que muestra un sistema de tres masas y tres resortes descrito por las tres coordenadas lineales  $y_1$ ,  $y_2$  y  $y_3$ .



*Figura 25 Sistema de tres Grados de Libertad*  
**Fuente: Singiresu 2012**

En la figura 26 se presenta un sistema de  $n$  grados de libertad, ya que muestra la deflexión de una viga en voladizo que requiere una infinidad de coordenadas que define la curva de deflexión.

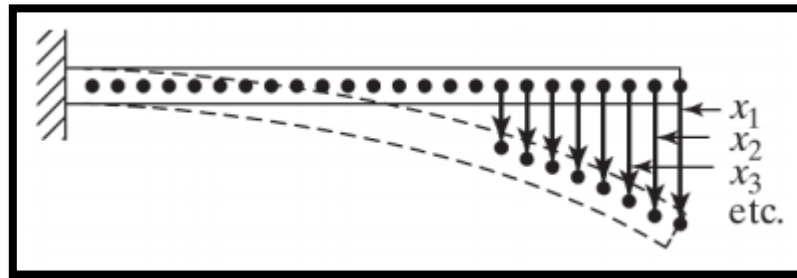


Figura 26 Sistema con infinidad de Grados de Libertad

Fuente: Singiresu 2012

#### 5.1.1.11 **Resonancia**

La condición de resonancia se produce cuando la frecuencia de excitación de la máquina se iguala con la frecuencia natural del sistema (máquina-cimentación-suelo), es decir si una fuerza relativamente pequeña es aplicada en forma continua hace que una amplitud de un sistema oscilante se haga muy grande. Este efecto se vuelve destructivo en algunas estructuras rígidas por lo cual es indispensable calcular la frecuencia natural del sistema para evitar amplitudes excesivas (ALDAMAS BARRERA, 2014).

#### 5.1.1.12 **Modo Principal de Vibración**

Un sistema de  $n$  grados de libertad vibra de una manera muy compleja en la que la frecuencia y la amplitud no siguen un mismo patrón fijo. Dentro de este desordenado movimiento, existe un tipo especial simple que se denomina modo principal de vibración en el que cada punto del sistema vibra con la misma frecuencia que la frecuencia natural del sistema.

#### 5.1.1.13 **Amortiguamiento.**

Este parámetro está directamente relacionado a la disipación de energía absorbiendo la respuesta de un sistema mecánico ya que se contrapone a la vibración libre de dicho sistema. Se identifica dos tipos de amortiguamientos, el primero si la fuerza de amortiguamiento es constante se llama amortiguamiento de Coulomb mientras que si la fuerza de amortiguamiento es proporcional a la velocidad se lo llama amortiguamiento viscoso (ALDAMAS BARRERA, 2014).

## **5.1.2 FACTORES QUE INTERVIENEN SOBRE UNA CIMENTACIÓN DE MAQUINARIA**

Se debe considerar que para que una cimentación cumpla su función durante toda su vida útil es necesario que en el cálculo de su diseño se identifique todos los factores que interactuarán en su entorno como pueden ser todas las cargas que actúan sobre ella, y para revisar todos estos factores a continuación presentaremos los más importantes dentro de las cimentaciones de las máquinas con las que estamos trabajando en este proyecto.

### **5.1.2.1 Factores Permanentes**

Los factores permanentes son todas las cargas que permanecen constantes durante toda su vida útil como es el caso del peso propio de la cimentación o bloque, el peso de la máquina, el peso de algunos accesorios como, por ejemplo, placas de reforzamiento, tuberías de conexión, tuberías para enfriamiento, contenedores propios del equipo, etc. (LIMAICO ÁLVAREZ, 2015)

### **5.1.2.2 Factores Variables**

Se refiere a las cargas vivas o de servicio que intervienen en la cimentación directamente, como pueden ser personal de mantenimiento, operadores, en nuestro caso las palanquillas, etc. En otros tiempos contrarrestaban este efecto incrementando de 3 a 5 veces la masa de la cimentación, pero actualmente se sabe que ese método es muy impreciso ya que no se puede garantizar que se produzca resonancia en el sistema (LIMAICO ÁLVAREZ, 2015).

### **5.1.2.3 Factores Térmicos**

Este factor se debe considerar en este caso ya que las máquinas que se emplean en este tipo de empresas siderúrgicas como lo es NOVACERO se encuentran constantemente a grandes temperaturas lo que produce una expansión y contracción de los elementos que conforman la máquina y son transferidos a los apoyos que sin una adecuada lubricación producen esfuerzos adicionales a la base en donde se encuentra la cimentación.

Sin embargo, este tipo de esfuerzos producto de la variación térmica son considerados en el instante del diseño y fabricación de la maquinaria por los ingenieros mecánicos, por tal motivo en el diseño de estas cimentaciones por lo general no es necesario incluirlas y solamente se las adiciona en el factor de seguridad de las cargas propuestas (CHAGCHA GUERRERO & VEGA RAZA, 2014).

#### 5.1.2.4 *Cargas Dinámicas*

Si se considera que las máquinas debido a su operación como lo hemos visto en capítulos anteriores, en el caso de máquinas reciprocas y rotatorias en particular, estas experimentan un desbalanceo en su mecanismo lo que provoca las fuerzas dinámicas. En la práctica de un ingeniero diseñador es sumamente necesario contar con información referente al funcionamiento y construcción de la máquina para calcular este tipo de fuerzas, por lo que el fabricante tiene la obligación de presentar la información complementaria de las cargas dinámicas que su máquina genera durante su funcionamiento (ALDAMAS BARRERA, 2014).

El desbalanceo que se produce en las máquinas para que se genere las cargas dinámicas son producto de varias causas dentro del tipo de máquina, el modelo, la instalación, su velocidad de operación lo que conduce a las vibraciones del sistema y a continuación presentaremos los motivos de esas vibraciones:

- a) El desbalanceo del equipo provocado por la desigualdad entre el eje geométrico del equipo y el eje de rotación del motor.
- b) Debido al uso de la maquinaria se genera desgaste natural lo que ocasiona desbalanceo y esfuerzos considerables.
- c) Diferentes fuerzas internas oscilatorias ejercidas sobre la base del equipo inducidas por la rotación de elementos pertenecientes a la máquina.
- d) Otra fuente de la vibración puede deberse a asentamientos de la cimentación o deformaciones, combinación de esfuerzos de la masa y rigidez del soporte y reacciones, etc.

(LIMAICO ÁLVAREZ, 2015)

Una vez explicados los conceptos básicos de la dinámica adaptada a las cimentaciones realizaremos una revisión del problema para el estudio de la metodología examinando las hipótesis que se generan en la investigación de Dobry y Gazetas, 1960 los mismos que asemejan a la cimentación como un bloque rígido apoyado sobre un suelo representado por un medio espacio elástico homogéneo.



A continuación, presentaremos las conjeturas para el cálculo del problema planteado:

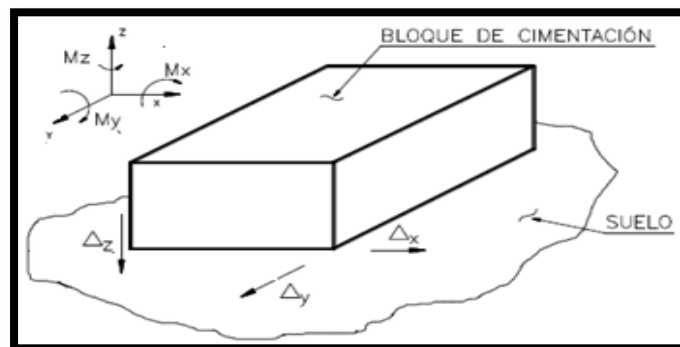
1. Existe una relación lineal entre el suelo que reacciona sobre la cimentación que está vibrando y el desplazamiento de la misma
2. El suelo no tiene propiedades inerciales, solo elásticas.
3. El bloque de cimentación solo tiene propiedades inerciales y no elásticas. Es decir, el bloque se mueve rígidamente, como un todo único.
4. Si el bloque de cimentación se encuentra parcial o totalmente embebido en el terreno, las reacciones elásticas del suelo actúan en la base de la cimentación y a lo largo de la superficie lateral.
5. El bloque de cimentación se representa como una base circular equivalente independientemente de la forma real de la base para una facilidad de cálculo.

(ALDAMAS BARRERA, 2014)

A demás Dobry y Gazetas, (1960) señalan que, en este modelo, una vez que se conocen las características de la masa rígida soportada por el medio espacio, el sistema real se reemplaza para cada modo de vibración por los tres parámetros de un sistema de un grado de libertad: una masa (o momento de inercia de masa), un resorte, y un amortiguamiento.

Se supone que los parámetros de estos sistemas son independientes de la frecuencia y, por tanto, solo son funciones de las propiedades del medio espacio (suelo), el radio del área de base circular equivalente y la masa total o el momento de masa de inercia de la cimentación más maquinaria (Dobry & Gazetas, Dynamic Response of Arbitrarily Shaped Machine, 1986).

En la figura 27 podemos visualizar las seis principales fuerzas dinámicas que pueden intervenir sobre el bloque de cimentación rígido.



*Figura 27 Grados de Libertad de un Bloque de Cimentación*  
**Fuente: Barrera; 2014**

- Una fuerza horizontal en dirección longitudinal a la cimentación (Py)
- Una fuerza horizontal en dirección transversal a la cimentación (Px)
- Una fuerza vertical (Pz)
- Un momento de cabeceo (My), alrededor del eje longitudinal Y
- Un momento de cabeceo (Mx), alrededor del eje longitudinal X
- Un momento torsionante (Mz), alrededor del eje vertical Z

Debido a las fuerzas aplicadas al bloque de cimentación se generan solicitaciones de respuesta para los seis grados de libertad que son:

- Desplazamiento en Z
- Desplazamiento en X
- Desplazamiento en Y
- Giro en Z
- Giro en X
- Giro en Y

A los desplazamientos de los tres ejes se los agrupa como “modos de vibración traslacional” mientras para los giros en los ejes son “modos rotacionales” (LIMAICO ÁLVAREZ, 2015).

Se presentan gráficos y ecuaciones para cada uno de los seis modos de vibración. Los parámetros adimensionales se han seleccionado cuidadosamente para proporcionar gráficos simples aplicables a una amplia variedad de formas de cimientos de áreas sólidas.

### **5.1.3 ENFOQUE BÁSICO DEL MOVIMIENTO**

Se empleará la figura 28 para fijar los parámetros principales, la cual consta de un disco rígido sin masa de forma arbitraria y área (A) de contacto, el mismo que se encuentra en la superficie de un semiespacio elástico (suelo) homogéneo y es alterado por las seis fuerzas dinámicas y momentos presentadas anteriormente de la forma presentada en la ecuación 3:

$$V = V_o \cdot e^{i\omega t} \quad \text{Ec. 3}$$

Dónde:

V= Es la fuerza armónica

V<sub>o</sub>= Es la amplitud de la fuerza

$e$ = Es una base logarítmica natural

$w$ = Frecuencia circular en [rad/s]

$t$ = Es el tiempo

$i = \sqrt{-1}$

Para cada uno de estos seis modos de vibración, es posible precisar un coeficiente de rigidez dinámico efectivo equivalente ( $k$ ) y un coeficiente de resorte equivalente o amortiguamiento ( $C$ ).

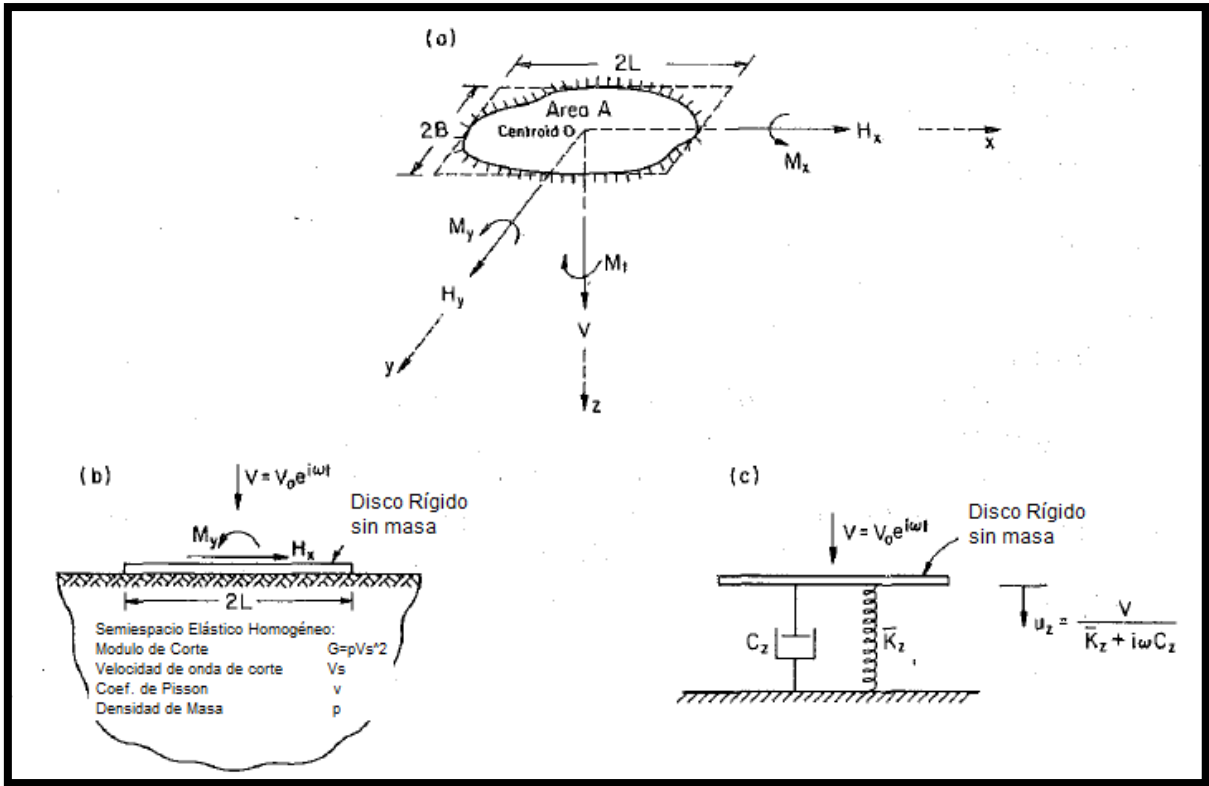


Figura 28 Enfoque Básico y Parámetros del Movimiento  
Fuente: Dobry y Gazetas; 1960

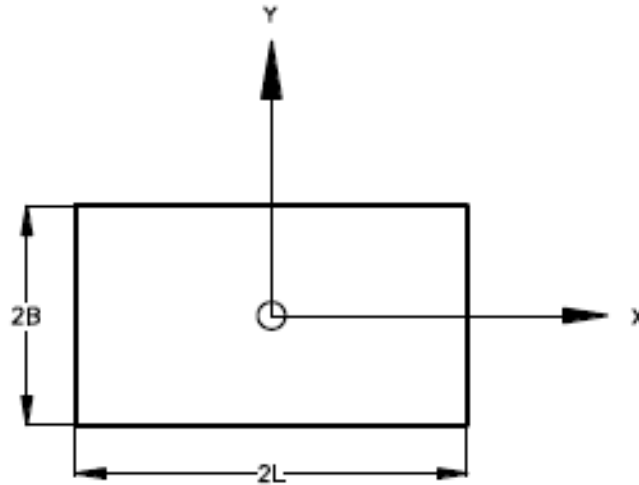
#### 5.1.4 COEFICIENTES DE RIGIDEZ DINÁMICOS

En este contenido se exponen los gráficos y ecuaciones de los coeficientes de rigidez dinámicos presentados en los estudios realizados por Dobry y Gazetas en la década de los 60s para un bloque de cimentación que se encuentra sometido a seis modos de vibración, como se puede observar en la figura 27, los mismos que a continuación se detallaran uno por uno.

**Nota:** Todos los gráficos y ecuaciones presentadas a continuación para el cálculo de las frecuencias y amplitudes del sistema máquina-cimentación-suelo, se obtuvieron en base a las investigaciones realizadas por Dobry y Gazetas dentro de la bibliografía presentada.

#### 5.1.4.1 *COEFICIENTE DE RIGIDEZ DINÁMICO VERTICAL*

El método que fue estudiado por Dobry y Gazetas requiere, primeramente, para su cálculo, definir el coeficiente de rigidez vertical estático a través de la determinación de variables como los ejes globales y las dimensiones del bloque de cimentación presentados en la figura 29 y ecuaciones siguientes.



*Figura 29 Ejes Globales y forma de la cimentación*

**Fuente:** Barrera; 2014

La ecuación 4 nos proporciona el valor de la rigidez estática para una variedad de formas de cimentación considerando una relación de  $L/B$ , introducida en el semiespacio homogéneo; el factor de reacción se lo determina en función de requerimientos de la ecuación 5 y resoluciones de la ecuación 6:

$$K_z = S_z \frac{2LG}{1-\nu} \quad \text{Ec. 4}$$

Dónde:

$$S_z = 0.8 \quad \text{para} \quad \frac{A}{(4L^2)} \leq 0.02 \quad \text{Ec. 5}$$

$$S_z = 0.73 + 1.54 \left( \frac{A}{4L^2} \right)^{0.75} \quad \text{Ec. 6} \quad \text{para} \quad \frac{A}{(4L^2)} > 0.02$$

Dónde:

$K_z$  = rigidez estática [t/m]

$S_z$  = Factor de reacción

$L$  = Semi largo de la geometría de cimentación [m] (ver ecuación 7)

$$(L = \frac{L'}{2}) \quad \text{Ec.7}$$

$L'$  = Largo de la geometría de la cimentación [m]

$G$  = Módulo de Rigidez al corte del suelo [t/m<sup>2</sup>]

$\nu$  = Módulo de poisson

$A$  = Área de la base de cimentación [m<sup>2</sup>]

Para el valor de  $S_z$  además de la ecuación 6, se lo puede determinar mediante la figura 30 de curvas empleando la relación de la ecuación 5 [ $A/4L^2$ ].

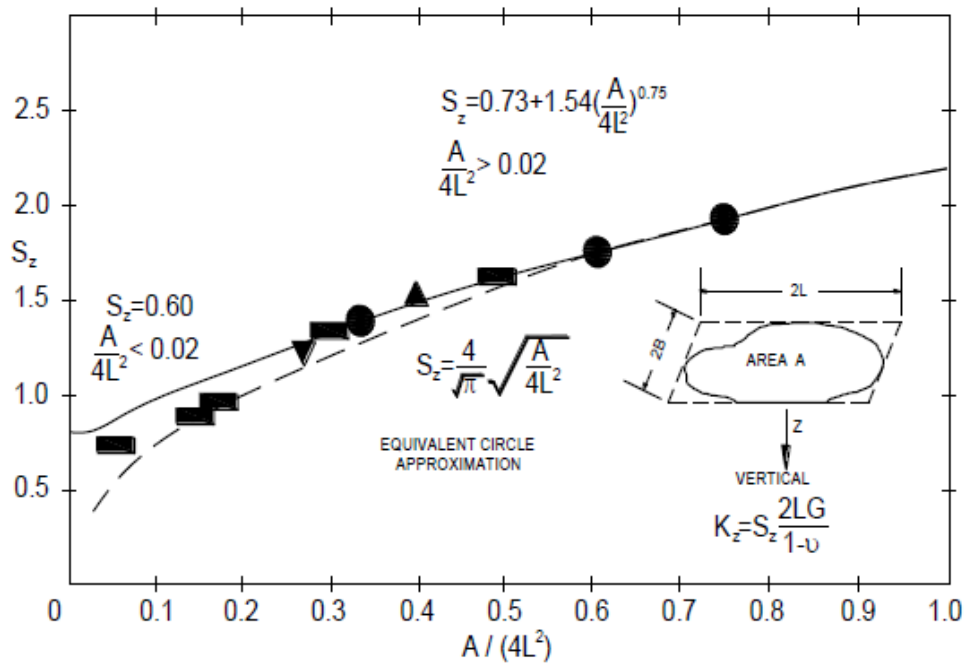


Figura 30 Rigidez vertical  $S_z$  contra la geometría rectangular de una cimentación en planta

Fuente: Barrera; 2014

El coeficiente de rigidez dinámico se determina a través de la figura 31, la cual relaciona el parámetro  $a_0$  que veremos en la ecuación 8 y la relación de rigidez dinámica a estática tanto para

valores de suelos saturados y no saturados que se identifican mediante valores de coeficiente de poissón de 0.33 para suelos no saturados y 0.5 para saturados.

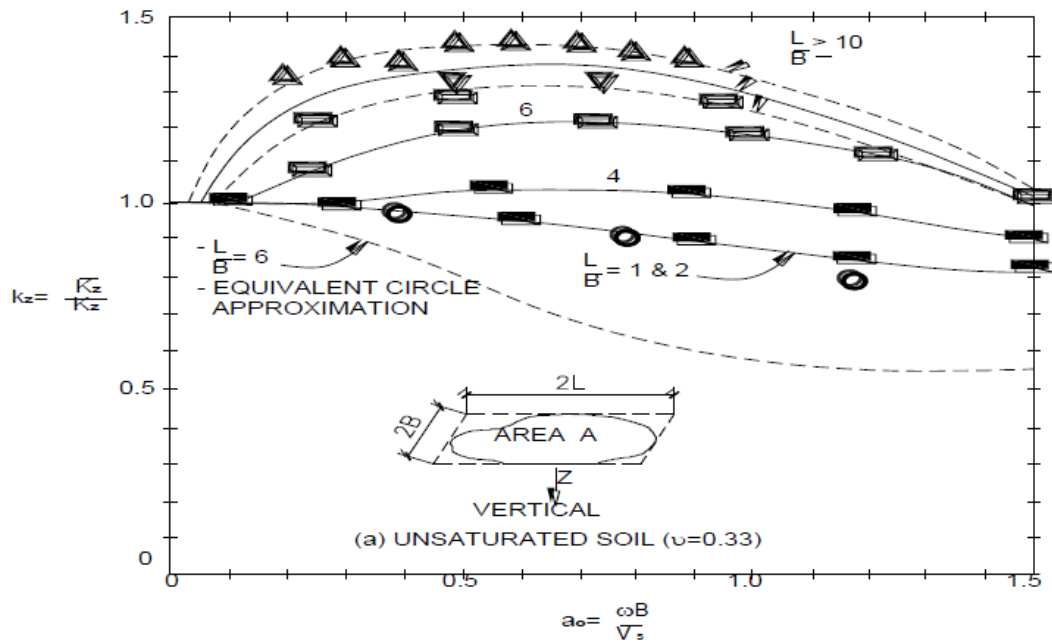


Figura 31 Módulo de rigidez vertical  $\bar{K}_z$  vs frecuencia de la máquina para diferentes geometrías de cimentación  
Fuente: Barrera; 2014

El valor de  $a_0$  se lo determina a través de la ecuación 8:

$$a_0 = \frac{\omega B}{V_s} \quad \text{Ec. 8}$$

Dónde:

$a_0$  = Parámetro dinámico

$\omega$  = Frecuencia de la máquina [rad/s]

$B$  = Semi ancho de la cimentación [m] (ver ecuación 9)

$$B = \frac{B'}{2} \quad \text{Ec. 9}$$

$B'$  = Ancho de la cimentación [m]

$V_s$  = Velocidad de onda de corte [m/s]

Una vez calculando  $\alpha_0$  nos dirigimos a las figuras 31 y con el resultado de L/B se logra resolver la relación de rigidez dinámica a estática ( $k_z$ ) para posteriormente determinar el valor del coeficiente de rigidez dinámico mediante el siguiente proceso:

Con la expresión de la ecuación 10:

$$k_z = \frac{\bar{K}_z}{K_z} \quad \text{Ec. 10}$$

Dónde:

$k_z$  = Relación de rigidez dinámica a estática

$\bar{K}_z$  = Coeficiente de rigidez dinámica [t/m]

$K_z$  = Coeficiente de rigidez estática [t/m]

De la cual se tendrá que despejar  $\bar{K}_z$  para poder obtener el valor del coeficiente de rigidez dinámica en la ecuación 11:

$$\bar{K}_z = k_z \cdot K_z \quad \text{Ec. 11}$$

Estas deducciones serán requeridas en el capítulo de cálculo para el diseño de las cimentaciones de este proyecto más adelante.

#### 5.1.4.2 COEFICIENTES DE RIGIDEZ DINAMICA HORIZONTAL

Se presenta para estos coeficientes de rigidez dos simples casos uno para la dirección corta “Y” y otra para la dirección longitudinal “X”, los procesos de cálculo para los coeficientes se presentan a continuación:

##### 5.1.4.2.1 Rigidez Dinámica en la dirección corta “Y”

Es expresada en la ecuación 12; el factor de reacción se lo determina en función de requerimientos de la ecuación 13 y resoluciones de la ecuación 14:

$$K_y = S_y \cdot \frac{2LG}{2-v} \quad \text{Ec. 12}$$

De dónde:

$$S_y = 2.24 \quad \text{para} \quad \frac{A}{4L^2} \leq 0.16 \quad \text{Ec. 13}$$

$$S_y = 4.5 \left( \frac{A}{4L^2} \right)^{0.38} \quad \text{Ec. 14} \quad \text{para} \quad \frac{A}{4L^2} > 0.16$$

Dónde:

$K_y$  = rigidez estática horizontal en dirección corta [t/m]

$S_y$  = Factor de reacción

$L$  = Semi largo de la geometría de cimentación [m]

$L'$  = Largo de la geometría de cimentación [m]

$G$  = Modulo de rigidez al corte del suelo [t/m<sup>2</sup>]

$\nu$  = Modulo de poisson

$A$  = Área de la base de cimentación [m<sup>2</sup>]

Los factores ( $S_y$ ) presentados en la ecuación 14 pueden también ser encontrados a través de la figura 32 de curvas generadas por las investigaciones de Dobry y Gazetas:

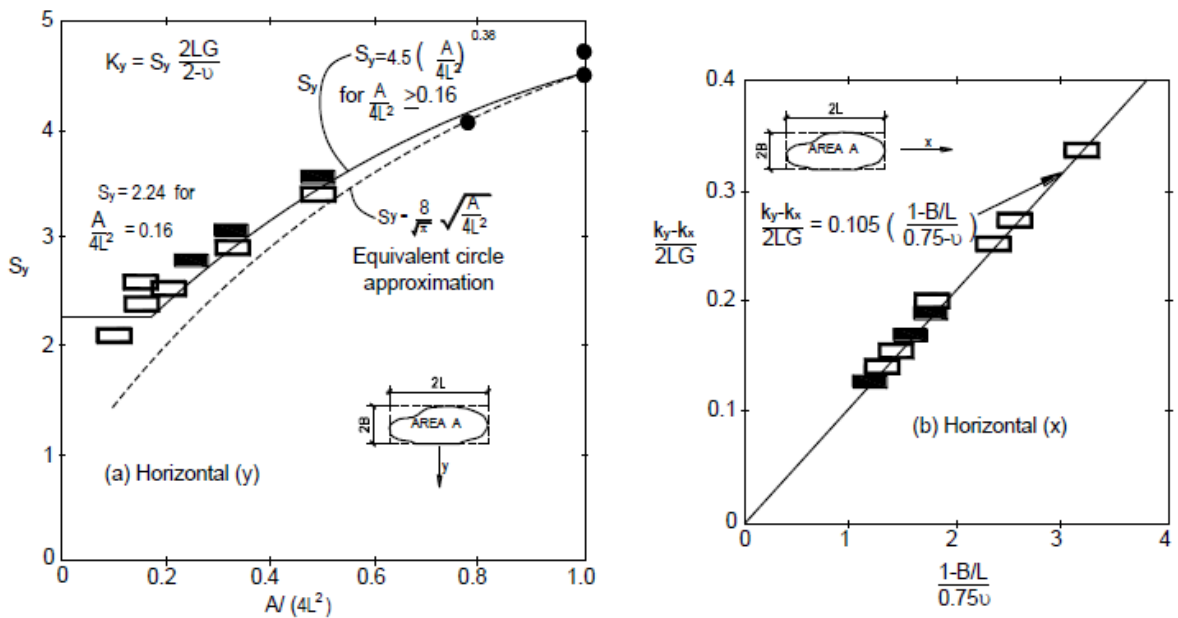


Figura 32 Factor de reacción estática horizontal  $S_y$ ,  $S_x$ , en (a) dirección corta, (b) en dirección longitudinal contra factores de forma de la cimentación

Fuente: Barrera; 2014

Cuando se logra determinar los valores tanto del factor de reacción ( $S_y$ ) como del coeficiente de rigidez estática, se procede a obtener el valor de la relación de rigidez dinámica a estática ( $k_y$ ) que se relacionan directamente con la relación  $L/B$  mediante la figura 33:



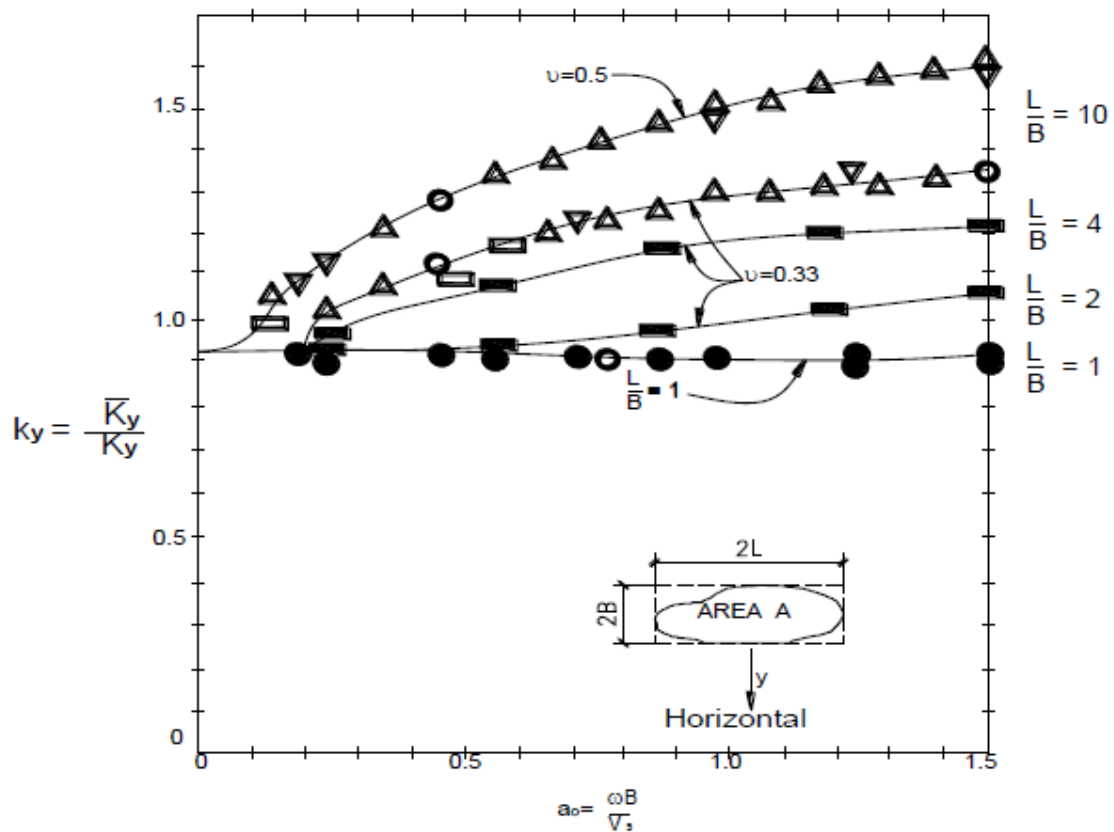


Figura 33 Rigidez dinámica horizontal  $\bar{K}_y$  de lado corto vs frecuencia de la máquina a diferentes formas geométricas rectangulares de la cimentación

Fuente: Barrera; 2014

Posteriormente a través del despeje de la ecuación 15, se termina determinando el valor del coeficiente de rigidez dinámico horizontal para la dirección corta:

$$k_y = \frac{\bar{K}_y}{K_y} \quad \text{Ec. 15}$$

Dónde:

$k_y$  = Relación de rigidez dinámica a estática

$\bar{K}_y$  = Coeficiente de rigidez dinámica [t/m]

$K_y$  = Coeficiente de rigidez estática [t/m]

Despejando la ecuación 15 tenemos la ecuación 16:

$$\bar{K}_y = k_y \cdot K_y \quad \text{Ec. 16}$$

#### 5.1.4.2.2 Rigidez Dinámica en la dirección longitudinal “X”

El proceso para poder llegar a la determinación de la rigidez dinámica en la dirección longitudinal es a través de una relación de la rigidez dinámica en dirección corta de la cimentación como observamos en la ecuación 17:

$$Kx = Ky - \frac{0.21 LG}{0.75 - v} \left(1 - \frac{B}{L}\right) \quad \text{Ec. 17}$$

Dónde:

$Kx$  = Rigidez estática horizontal en dirección longitudinal [t/m]

$Ky$  = Rigidez estática horizontal en dirección corta [t/m]

$L$  = Semi largo de la geometría de la cimentación [m] (ver ecuación 7)

$$L = \frac{L'}{2} \quad \text{Ec. 7}$$

$L'$  = Largo de la geometría de cimentación [m]

$G$  = Módulo de rigidez al corte del suelo [t/m<sup>2</sup>]

$v$  = Relación de poisson

$B$  = Semi ancho de la geometría de la cimentación [m]

Como todos los valores de la ecuación son conocidos se procede a determinar el valor del coeficiente de rigidez estática en dirección longitudinal para proceder con el cálculo de la rigidez dinámica de la dirección longitudinal.

La ecuación 18 se presta para la definición de ese término:

$$kx = \frac{\bar{K}x}{Kx} \quad \text{Ec. 18}$$

Dónde:

$kx$  = Relación de rigidez dinámica a estática

$\bar{K}x$  = Coeficiente de rigidez horizontal dinámica dirección longitudinal [t/m]

$Kx$  = Coeficiente de rigidez horizontal estática dirección longitudinal [t/m]

Se despeja la variable  $\bar{K}x$  de la ecuación 18 y se obtiene la ecuación 19:

$$\bar{K}x = kx \cdot Kx \quad \text{Ec. 19}$$

Para este caso los autores del método dentro de sus estudios y modelos se percataron que la relación de rigidez dinámica a estática en los cálculos daba la unidad por lo que la ecuación 19 se transforma a la ecuación 20:

$$\bar{K}x = (1) \cdot Kx \rightarrow \bar{K}x = Kx \quad \text{Ec. 20}$$

#### 5.1.4.3 **COEFICIENTES DE RIGIDEZ DINÁMICA POR CABECEO**

Para estos coeficientes de igual forma que los anteriores se dividen a coeficientes de rigidez dinámica por cabeceo en dirección a sus dos ejes principales (x) y (y).

##### 5.1.4.3.1 **RIGIDEZ DINÁMICA POR CABECEO EN DIRECCIÓN DEL EJE CORTO “Y”**

De la misma manera comenzamos determinando la rigidez por cabeceo estática mediante la ecuación 21 y el factor de reacción se lo determina en función de requerimientos de la ecuación 22 y resoluciones de la ecuación 23:

$$K_{rx} = S_{rx} \left( \frac{G}{1-v} \right) (Ix)^{0.75} \quad \text{Ec. 21}$$

De dónde:

$$S_{rx} = \frac{2.54}{\left(\frac{B}{L}\right)^{0.25}} \quad \text{Ec. 23} \quad \text{para} \quad \frac{B}{L} \leq 0.4 \quad \text{Ec. 22}$$

$$S_{rx} = 3.2 \quad \text{para} \quad \frac{B}{L} > 0.4$$

Dónde:

$K_{rx}$  = Rigidez estática a cabeceo en dirección corta [t-m/rad]

$S_{rx}$  = Factor de reacción

$L$  = Semi largo de la geometría de la cimentación [m] (ver ecuación 7)

$$L = \frac{L'}{2} \quad \text{Ec. 7}$$

$L'$  = Largo de la geometría de cimentación [m]

$G$  = Módulo de rigidez al corte del suelo [t/m<sup>2</sup>]

$v$  = Relación de Poisson

$B$  = Semi ancho de la base de la cimentación [m]

$I_x$  = Momento de la inercia de la cimentación alrededor del eje x [m<sup>4</sup>]

Mediante el valor obtenido en la ecuación 21 nos introducimos en la figura 34 que se presenta a continuación y con el parámetro de  $L/B$  se puede obtener el resultado de la relación de rigidez dinámica a estática como se muestra:

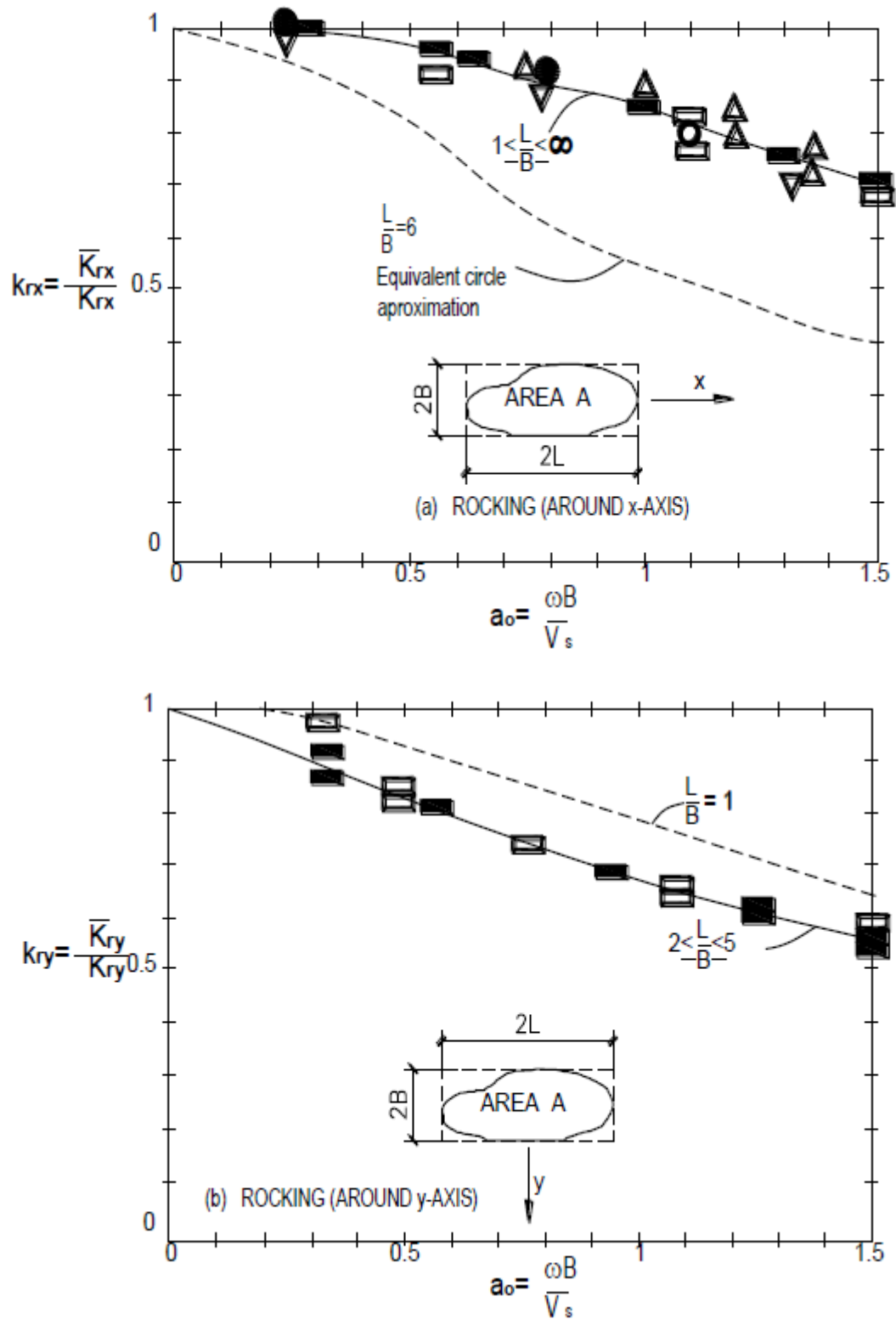


Figura 34 Rigidez dinámica por cabeceo en dirección del eje a) Corto, b) longitudinal, vs frecuencia de la máquina de diferentes formas de cimentación

Fuente: Barrera; 2014

Una vez obtenido el parámetro, se realiza el despeje de la ecuación 24 para obtener la ecuación 25:

$$k_{rx} = \frac{\bar{K}_{rx}}{K_{rx}} \quad \text{Ec. 24}$$

$$\bar{K}_{rx} = k_{rx} \cdot K_{rx} \quad \text{Ec. 25}$$

Dónde:

$k_{rx}$  = Relación de rigidez dinámica a estática por cabeceo

$\bar{K}_{rx}$  = Coeficiente de rigidez por cabeceo dinámica dirección corta [t-m/rad]

$K_{rx}$  = Coeficiente de rigidez por cabeceo estática dirección corta [t-m/rad]

#### 5.1.4.3.2 **RIGIDEZ DINÁMICA POR CABECEO EN DIRECCIÓN DEL EJE LONGITUDINAL “X”**

Este coeficiente se lo calcula a través de las siguientes ecuaciones y procesos:

Primeramente, mediante la ecuación 26 calculamos rigidez estática:

$$K_{ry} = S_{ry} \left( \frac{G}{1-\nu} \right) (I_y)^{0.75} \quad \text{Ec. 26}$$

Dónde:

$$S_{ry} = 3.2$$

$K_{ry}$  = Rigidez estática a cabeceo en dirección longitudinal [t-m/rad]

$S_{ry}$  = Factor de reacción que en este caso solo es 3.2

$G$  = Módulo de rigidez al corte del suelo [t/m<sup>2</sup>]

$\nu$  = Relación de Poisson

$I_y$  = Momento de inercia de la cimentación alrededor de eje y [m<sup>4</sup>]

Luego de adquirir este valor nos dirigimos a la Figura 34 (b) para poder obtener el valor de la relación de la ecuación 27:

$$k_{ry} = \frac{\bar{K}_{ry}}{K_{ry}} \quad \text{Ec. 27}$$

Dónde:

$k_{ry}$  = Relación de rigidez dinámica a estática por cabeceo

$\bar{K}_{ry}$  = Coeficiente de rigidez por cabeceo dinámica dirección longitudinal [t-m/rad]

$K_{rx}$  = Coeficiente de rigidez por cabeceo estática dirección longitudinal [t-m/rad]

Para finalmente despejar la ecuación 27 y obtener la ecuación 28:

$$\bar{K}_{ry} = k_{ry} \cdot K_{ry} \quad \text{Ec. 28}$$

#### 5.1.4.4 **RIGIDEZ DINÁMICA POR TORSIÓN**

Las siguientes ecuaciones otorgadas por los investigadores Dobry y Gazetas permiten el cálculo del coeficiente de rigidez torsional en dirección del eje vertical z a través de la ecuación 29 y el factor de reacción se lo determina en función de requerimientos de la ecuación 30 y resoluciones de la ecuación 31:

$$K_t = S_t G (J_z)^{0.75} \quad \text{Ec. 29}$$

De dónde:

$$S_t = 3.8 + 10.7 \left(1 - \frac{B}{L}\right)^{10} \quad \text{Ec. 31} \quad \text{para} \quad \frac{B}{L} \geq 0.25 \quad \text{Ec. 30}$$

$$S_t = 3.8 \quad \text{para} \quad \frac{B}{L} < 0.25$$

Dónde:

$K_t$  = Rigidez estática por torsión [t-m/rad]

$S_t$  = Factor de reacción por torsión

$G$  = Módulo de rigidez al corte del suelo [t/m<sup>2</sup>]

$\nu$  = Relación de Poisson

$J_z$  = momento polar de inercia de la cimentación [m<sup>4</sup>]

De la misma forma como en los otros casos se determina la relación de rigidez dinámica a estática en la figura 35 siguiente con ayuda del término L/B para despejar la ecuación y llegar a nuestro resultado final:

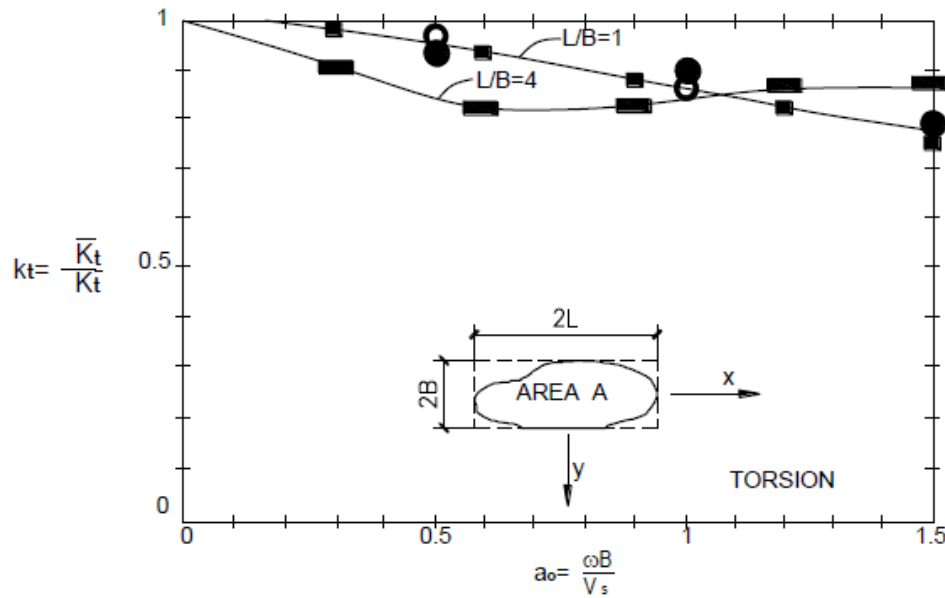


Figura 35 Rigidez torsional dinámica  $\bar{K}_t$  vs frecuencia de la máquina para diferentes formas geométricas

Fuente: Barrera; 2014

Obtenido el parámetro continuamos con el proceso del despeje de la ecuación 32:

$$k_t = \frac{\bar{K}_t}{K_t} \quad \text{Ec. 32}$$

Dónde:

$k_t$  = Relación de rigidez dinámica a estática por torsión

$\bar{K}_t$  = Coeficiente de rigidez por torsión dinámica [t-m/rad]

$K_t$  = Coeficiente de rigidez por torsión estática [t-m/rad]

Despejando la ecuación 32 se tiene la ecuación 33:

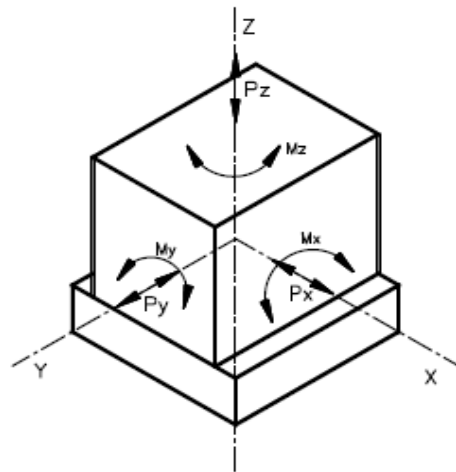
$$\bar{K}_t = k_t \cdot K_t \quad \text{Ec. 33}$$

### 5.1.5 DISTINCIÓN DINÁMICA DE LA CIMENTACIÓN DE MAQUINARIA

Partiendo del concepto de que se presentan en una cimentación dinámica seis grados de libertad mencionados y explicados en capítulos anteriores, esto debido a fuerzas que intervienen en el bloque para que mediante estas cargas dinámicas se produzca desplazamientos y giros que deben ser tolerados por el semiespacio (suelo), a continuación, se presenta una serie de rigideces del suelo

figurados por resortes equivalentes. Los seis grados de libertad estudiados presentes en la figura 36 son (ALDAMAS BARRERA, 2014):

1. Traslación en dirección Z
2. Traslación en dirección X
3. Traslación en dirección Y
4. Rotación alrededor del eje Z
5. Rotación alrededor del eje X
6. Rotación alrededor del eje Y



*Figura 36 Grados de libertad en un bloque de cimentación*

**Fuente: Barrera; 2014**

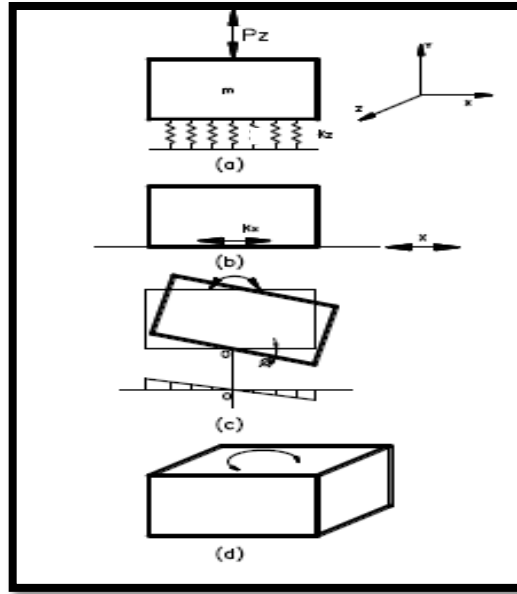
#### **5.1.5.1 RIGIDEZ DEL SUELO REPRESENTADO POR RESORTES EQUIVALENTES**

Para este análisis precisaremos que el suelo es un elemento homogéneo, elástico e isotrópico, en el cual se encuentra el bloque de cimentación sometido a las acciones antes estudiadas que son:

- Excitación vertical (producto de una compresión uniforme)
- Traslación horizontal (genera cortantes uniformes)
- Cabeceo o giro (por compresión no uniforme)
- Torsión (por cortantes no uniformes)

En la figura 37 se visualiza estas cuatro acciones presentadas para su evaluación:





*Figura 37 Vibración en un bloque de cimentación. (a) Vibración vertical, (b) vibración horizontal, (c) vibración por cabeceo, (d) Vibración por torsión.*

**Fuente: Barrera; 2014**

Una vez que se obtuvo los coeficientes de rigidez dinámica de la cimentación para las cuatro acciones mencionadas anteriormente y con el concepto de relacionar a la rigidez del suelo como un resorte equivalente, se procede a la determinación de los coeficientes elásticos uniformes presentes en el suelo de desplante; este coeficiente se le podría considerar igual al coeficiente de balasto, sin embargo, debido a su condición de vibración que presenta el bloque de cimentación producidos por el equipo, se lo define como coeficiente elástico uniforme expresado en la ecuación 34:

$$C_{eu} = \frac{k}{A} \quad \text{Ec. 34}$$

Dónde:

$C_{eu}$  = Coeficiente elástico uniforme [t/m<sup>3</sup>]

$k$  = Rigidez del suelo (constante del resorte) [t/m]

$A$  = Área de la base [m<sup>2</sup>]

Para la determinación de los coeficientes elásticos uniformes de los cuatro casos presentes en la Figura 37, se considera que el coeficiente de rigidez dinámico de la cimentación es semejante a la rigidez del suelo debido a la interacción que presentan en el sistema cimentación-suelo.

El coeficiente elástico uniforme a compresión (ecuación 35) expuesto en el caso de la figura 37 (a) es:

$$C_u = \frac{K_v}{A} \quad \text{Ec. 35}$$

Dónde:

$C_u$  = Coeficiente elástico uniforme a compresión [t/m<sup>3</sup>]

$K_v$  = Rigidez del suelo (constante del resorte) en vibración vertical [t/m] =  $\bar{K}_z$

$A$  = Área de la base [m<sup>2</sup>]

El coeficiente elástico uniforme a cortante en las direcciones x, y (Ecuaciones 36 y 37) expuesto en el caso de la figura 37 (b) es:

$$C_{\tau x} = \frac{K_{hx}}{A} \quad \text{Ec. 36}$$

$$C_{\tau y} = \frac{K_{hy}}{A} \quad \text{Ec. 37}$$

Dónde:

$C_{\tau x}, C_{\tau y}$  = Coeficiente elástico uniforme a cortante [t/m<sup>3</sup>]

$K_{hx}, K_{hy} = \bar{K}_x, \bar{K}_y$  = Rigidez del suelo (constante del resorte) en vibración horizontal [t/m]

$A$  = Área de la base [m<sup>2</sup>]

El coeficiente elástico no uniforme a compresión producto del cabeceo alrededor de los ejes x, y respectivamente (ecuaciones 38 y 39) expuesto en el caso de la figura 37 (c) es:

$$C_{\phi x} = \frac{K_{\phi x}}{I_x} \quad \text{Ec. 38}$$

$$C_{\phi x} = \frac{K_{\phi y}}{I_y} \quad \text{Ec. 39}$$

Dónde:

$C_{\phi x}$  = Coeficiente elástico no uniforme a compresión [t/m<sup>3</sup>]

$K_{\phi x}, K_{\phi y} = \bar{K}_{rx}, \bar{K}_{ry}$  = Rigidez del suelo (constante del resorte) en vibración por cabeceo [t/m]

I = Momento de inercia de la planta del bloque de cimentación [m<sup>4</sup>]

El momento de inercia debido a que la cimentación es rectangular se expresa en las ecuaciones 40 y 41:

$$I_x = \frac{a.b^3}{12} \quad \text{Ec. 40} \quad \text{y} \quad I_y = \frac{b.a^3}{12} \quad \text{Ec. 41}$$

El coeficiente elástico no uniforme a cortante producto de la torsión alrededor del eje z expuesto en el caso de la Figura 37 (d) es expresada en la ecuación 42 así:

$$C_{\psi} = \frac{K_{\psi}}{I_z} \quad \text{Ec. 42}$$

Dónde:

$C_{\psi}$  = Coeficiente elástico no uniforme a cortante [t/m<sup>3</sup>]

$K_{\psi} = \bar{K}_t$  = Rigidez del suelo (constante del resorte) en vibración por torsión [t/m]

$J_z$  = Momento de inercia polar de la planta del bloque de cimentación [m<sup>4</sup>] (ver ecuación 43)

$$J_z = I_x + I_y \quad \text{Ec. 43}$$

#### 5.1.5.2 **VIBRACIÓN VERTICAL EN EL BLOQUE DE CIMENTACIÓN**

Se comenzará con la estimación de una fuerza dinámica vertical  $P_z$  presente en la ecuación 44 ubicada en el centro de gravedad del bloque de cimentación actuando en su área descrita gráficamente en la figura 38, para casos particulares:

$$P_z = P_o \text{ sen } \omega t \quad \text{Ec. 44}$$

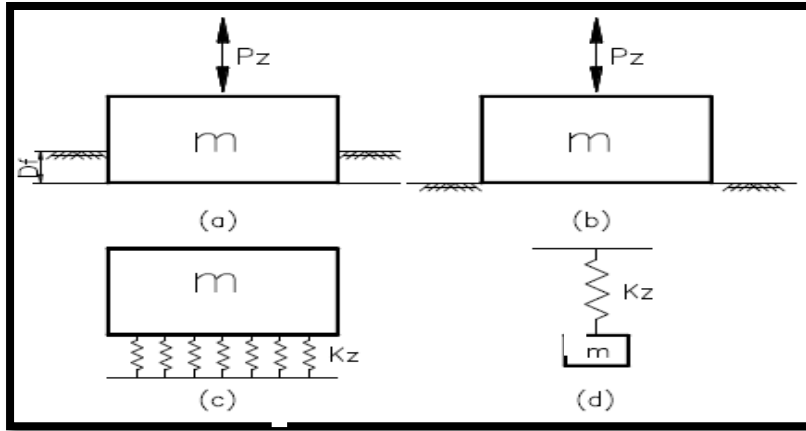


Figura 38 Bloque de cimentación bajo carga dinámica vertical. (a) bloque desplantado a una profundidad  $D_f$ , (b) bloque desplantado a nivel del piso para análisis, (c) suelo representado por resortes equivalentes  $K$ , (d) sistema equivalente resorte-masa para análisis.

Fuente: Barrera; 2014

En la práctica los bloques de cimentación por lo general se encuentran incrustados en el suelo de desplante como lo podemos observar en la figura 38 (a) a una profundidad  $D_f$  con el objetivo de reducir las amplitudes de vibración, pero por motivos de análisis del método se desestima estos efectos por consecuencia de sus mínimos incrementos en sus resultados como se presenta en la figura 38 (b) y se lo reemplaza por su equivalente  $K$  como esta en la figura 38 (c) o se sustituye por el sistema de la figura 38 (d) para una facilidad de ejecución de la ecuación 45.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{m}} \quad \text{Ec. 45}$$

Dónde:

$\omega_n$  = Frecuencia natural circular en vibración [rad/s]

$K = K_v$  = Rigidez del suelo (constante del resorte) en vibración vertical [t/m]     $m$  = Masa del bloque de cimentación [t-s<sup>2</sup>/m]

La frecuencia natural determinada para el caso de la figura 38 es expresada en la ecuación 46:

$$\omega_{nz} = \sqrt{\frac{K_v}{m}} \quad \text{Ec. 46}$$

Dónde:

$\omega_{nz}$  = Frecuencia natural circular en vibración vertical [rad/s]

$K_v$  = Rigidez del suelo (constante del resorte) en vibración vertical [t/m]

$m$  = Masa del bloque de cimentación [t-s<sup>2</sup>/m]

Por tanto, la ecuación 46 se transforma en la ecuación 47 de frecuencia natural del sistema:

$$\omega_{nz} = \sqrt{\frac{C_u \cdot A}{m}} \quad \text{Ec. 47}$$

Y la amplitud máxima producida por las vibraciones verticales se presenta de la ecuación 48:

$$A_{zmax} = \frac{P_o}{m(\omega_{nz}^2 - \omega^2)} \quad \text{Ec. 48}$$

Dónde:

$A_{zmax}$  = Amplitud máxima de la vibración vertical [mm]

$P_o$  = Fuerza dinámica máxima [t]

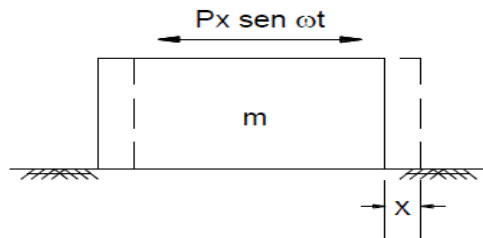
$\omega_{nz}$  = Frecuencia natural circular del sistema en vibración vertical [rad/s]

$\omega$  = Frecuencia de operación de la máquina [rad/s]

$m$  = Masa del bloque de cimentación [t-s<sup>2</sup>/m]

### 5.1.5.3 **VIBRACIÓN HORIZONTAL EN EL BLOQUE DE CIMENTACIÓN**

Este caso es semejante al de la vibración vertical, también se tiene un bloque de cimentación en el cual se presenta una fuerza dinámica, pero horizontal situada en el centro de gravedad del área de la cimentación, con la misma que se produce un desplazamiento horizontal como se observa en la figura 39:



*Figura 39 Bloque de cimentación sujeto a vibración horizontal*

**Fuente: Barrera; 2014**

Empleando una de las constantes del resorte del suelo en dirección horizontal tanto en x como en y las frecuencias naturales del sistema para cada caso de la figura 39 es determinada en base a las ecuaciones 49 y 50 respectivamente:

$$\omega_{nx} = \sqrt{\frac{K_{hx}}{m}} \quad \text{Ec. 49}$$

$$\omega_{ny} = \sqrt{\frac{K_{hy}}{m}} \quad \text{Ec. 50}$$

Dónde:

$\omega_{nx}, \omega_{ny}$  = Frecuencia natural circular en vibración horizontal [rad/s]

$K_{hx}, K_{hy}$  = Rigidez del suelo (constante del resorte) en traslación [t/m]

$m$  = Masa del bloque de cimentación [t-s<sup>2</sup>/m]

La frecuencia natural circular del sistema deducida anteriormente para cada caso se incorpora en las ecuaciones 51 y 52 respectivamente:

$$\omega_{nx} = \sqrt{\frac{K_{hx}}{m}} = \sqrt{\frac{C_{tx}.A}{m}} \quad \text{Ec. 51}$$

$$\omega_{ny} = \sqrt{\frac{K_{hy}}{m}} = \sqrt{\frac{C_{ty}.A}{m}} \quad \text{Ec. 52}$$

Y las amplitudes máximas producida por las vibraciones horizontales en dirección x, y se presenta en las ecuaciones 53 y 54:

$$A_x = \frac{P_x}{m(\omega_{nx}^2 - \omega^2)} \quad \text{Ec. 53}$$

$$A_y = \frac{P_y}{m(\omega_{ny}^2 - \omega^2)} \quad \text{Ec. 54}$$

Dónde:

$A_x, A_y$  = Amplitudes máximas de la vibración horizontal en dirección x, y [mm]

$P_x, P_y$  = Fuerzas dinámicas máximas horizontales en dirección x, y [t]

$\omega_{nx}, \omega_{ny}$  = Frecuencias naturales circulares del sistema en vibración horizontal en dirección x, y [rad/s]

$\omega$  = Frecuencia de operación de la máquina [rad/s]

#### 5.1.5.4 **VIBRACIÓN POR CABECEO EN EL BLOQUE DE CIMENTACIÓN**

En la figura 40 se visualiza el efecto de vibración de cabeceo del bloque de cimentación producto de la concentración de un momento dinámico ( $M_y = M_o \text{ sen } \omega t$ ) aplicado en el área de fundación alrededor del eje principal y, perpendicular al plano xz, y considerando que la cimentación es simétrica con respecto al eje y, para que de esta forma se llegue a una coincidencia entre el centro de gravedad de la máquina y del centroide de la base.

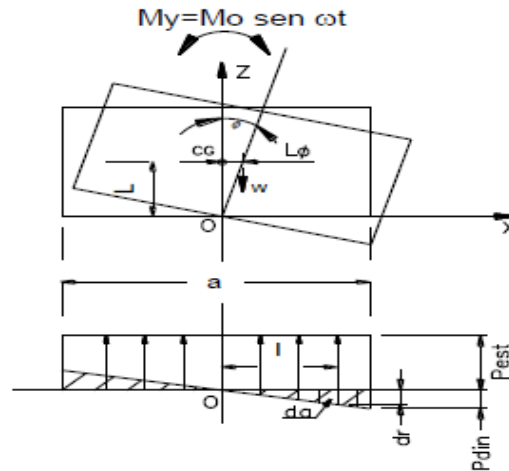


Figura 40 Bloque de cimentación bajo vibraciones de cabeceo

**Fuente: Barrera; 2014**

Para lograr resolver este efecto se considera la hipótesis en que la resistencia al deslizamiento es considerable y que existe únicamente rotación alrededor del eje que pasa por el punto 0, con lo que nos indicaría que presenta solo un grado de libertad en el sistema que sería de giro y genera solo momentos en el centro de rotación.

La frecuencia natural del sistema para el caso de la figura 40 se determina en función de las ecuaciones 55 y 56:

$$\omega_{n\phi} = \sqrt{\frac{K_{\phi}}{M_{mo}}} \quad \text{Ec. 55}$$

$$\omega_{n\phi} = \sqrt{\frac{C_{\phi} \cdot I}{M_{mo}}} \quad \text{Ec. 56}$$

Dónde:

$\omega_{n\phi}$  = Frecuencia natural circular en cabeceo [rad/s]

$K_{\phi}$  = Rigidez del suelo (constante del resorte) en vibración por cabeceo [t-m/rad]

$M_{mo}$  = Momento de inercia de la masa de la máquina y la cimentación alrededor del eje horizontal perpendicular al plano de análisis del área de contacto con el suelo [t-m-s<sup>2</sup>]

$I$  = Momento de inercia de la planta del bloque de cimentación [m<sup>4</sup>]

El momento de inercia de la masa de la máquina y la cimentación alrededor del eje horizontal perpendicular al plano de análisis se determina por la ecuación 57.

$$M_{mo} = \sum M_A \left[ \frac{a_{xa}^2 + a_{za}^2}{12} \right] + M_A \bar{Z}_{ia}^2 + \bar{X}_{ia}^2 \quad \text{Ec. 57}$$

Para la determinación se genera una descomposición de la cimentación en elementos geométricos más simples y se realiza un sumatorio total.

Dónde:

$M_{mo}$  = Momento de inercia de la masa de la máquina y la cimentación alrededor del eje horizontal.

$M_A$  = Masa de cada elemento geométrico de la cimentación y de la máquina. [t-s<sup>2</sup>/m]

$a_{xa}, a_{za}$  = Dimensiones en x, z de los elementos de la cimentación. [m]

$\bar{Z}_{ia}$  = Centro de gravedad en z de cada elemento de la cimentación y de la máquina. [m]

$\bar{X}_{ia}$  = Distancia entre el centro de gravedad del sistema máquina-cimentación y el centro de gravedad de cada elemento

Y la amplitud por giro que se genera por las vibraciones por cabeceo que se visualizan en la figura 40 se expresa en la ecuación 58:

$$A_{\phi} = \frac{M_0}{M_{mo}(\omega_{n\phi}^2 - \omega^2)} \quad \text{Ec. 58}$$

Dónde:

$A_{\phi}$  = Amplitud máxima de la vibración por cabeceo [rad]

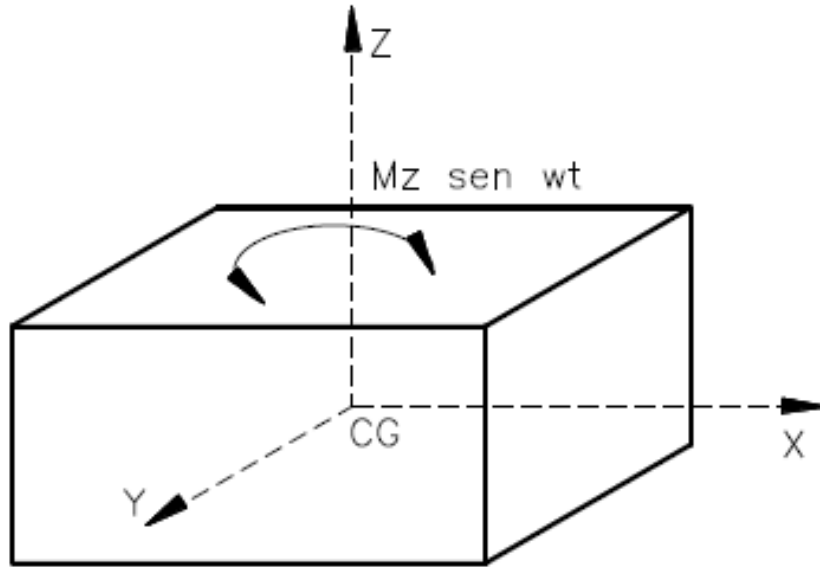
$M_0$  = Momento máximo calculado por el fabricante del equipo con relación al punto (o) alrededor del eje z [t-m]



$\omega_{n\phi}$  = Frecuencia natural circular del sistema en vibración por cabeceo [rad/s]

$\omega$  = Frecuencia de operación de la máquina [rad/s]

#### 5.1.5.5 **VIBRACIÓN POR TORSIÓN EN EL BLOQUE DE CIMENTACIÓN**



*Figura 41 Bloque de cimentación bajo vibración por torsión*

**Fuente: Barrera; 2014**

Como se presenta en la Figura 41 las vibraciones por torsión se generan debido al efecto de un momento dinámico alrededor del eje vertical z, para el cálculo de este factor se desarrolla las ecuaciones 59 y 60 sin tomar en cuenta los efectos de amortiguamiento ya que son valores despreciables.

La frecuencia natural del sistema para el caso de la figura 41 es:

$$\omega_{n\psi} = \sqrt{\frac{K_{\psi}}{M_{mz}}} \quad \text{Ec. 59}$$

$$\omega_{n\psi} = \sqrt{\frac{C_{\psi} J_z}{M_{mz}}} \quad \text{Ec. 60}$$

Dónde:

$\omega_{n\psi}$  = Frecuencia natural circular en vibración torsional [rad/s]

$K_{\psi}$  = Rigidez del suelo (constante del resorte) en vibración por torsión [t/m]

$M_{mz}$  = Momento polar de inercia de masa de la máquina y la cimentación alrededor de un eje vertical perpendicular al plano del área de contacto con el suelo [t-m-s<sup>2</sup>] (ver ecuación 61)

$$M_{mz} = M_{mcz} + M_{mcimz} \quad \text{Ec. 61}$$

$C_\psi$  = Coeficiente elástico no uniforme a cortante [t/m<sup>3</sup>]

$J_z$  = Momento de inercia polar de la planta del bloque de cimentación [m<sup>4</sup>]

El momento polar de inercia de masa de la máquina se determina por la ecuación 62:

$$M_{mcz} = \frac{m'}{12} [a^2 + b^2] \quad \text{Ec. 62}$$

Dónde:

$M_{mcz}$  = Momento polar de inercia de la masa de la máquina [t. m. s<sup>2</sup>]

$m'$  = Masa de la máquina [t-s<sup>2</sup>/m] (ver ecuación 63)

$$m' = \frac{w'}{g} \quad \text{Ec 63}$$

$w'$  = Peso de la máquina [t]

$g$  = Gravedad [m/s<sup>2</sup>]

$a, b$  = Geometría de la base de la máquina

El momento polar de inercia de masa de la cimentación se determina por la ecuación 64:

$$M_{mcimz} = \frac{m}{12} [L'^2 + B'^2] \quad \text{Ec. 64}$$

Dónde:

$M_{mcimz}$  = Momento polar de inercia de la masa de la cimentación [t. m. s<sup>2</sup>]

$m$  = Masa de la cimentación [t-s<sup>2</sup>/m] (ver ecuación 65)

$$m = \frac{w}{g} \quad \text{Ec. 65}$$

$w$  = Peso de la cimentación [t]

$g$  = Gravedad [m/s<sup>2</sup>]

$L', B'$  = Geometría de la base de la cimentación

Con lo cual el máximo desplazamiento angular por torsión en el bloque se presenta en la ecuación 66:

$$\psi_{max} = \frac{M_0}{M_{mz}(\omega^2 n\psi - \omega)} \quad \text{Ec. 66}$$

Dónde:

$\psi_{max}$  = Movimiento de Giro por torsión [rad]

#### 5.1.5.6 **VIBRACIÓN SIMULTÁNEA VERTICAL, DESLIZAMIENTO**

#### **HORIZONTAL Y CABECEO EN EL BLOQUE DE CIMENTACIÓN**

Se muestra a continuación con ayuda de la figura 42, un bloque de cimentación expuesto a tres diferentes efectos de fuerzas dinámicas simultáneas y las consecuencias que provoca al sistema, estas fuerzas son reconocidas como una fuerza dinámica vertical ( $P_z$ ), una fuerza dinámica horizontal ( $P_x$ ) y un momento concentrado de volteo.

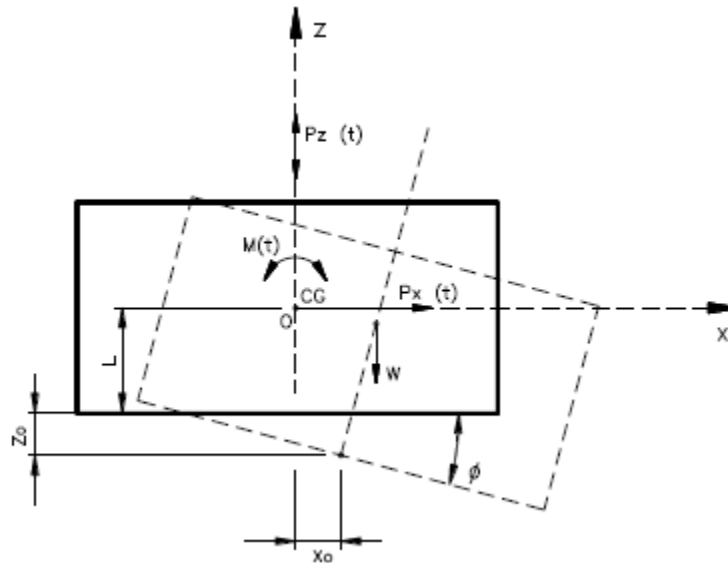


Figura 42 Bloque de cimentación expuesto a fuerzas dinámicas simultáneas.

**Fuente: Barrera; 2014**

Estas fuerzas dinámicas también son expresadas en las ecuaciones 67, 68 y 69 en función del tiempo como:

$$P_z(t) = P_z \text{ sen } \omega t \quad \text{Ec. 67}$$

$$P_x(t) = P_x \text{ sen } \omega t \text{ Ec. 68}$$

$$M(t) = M_y \text{ sen } \omega t \quad \text{Ec. 69}$$

Todas estas cargas se encuentran actuando como se puede ver en la figura 42 en el centro de gravedad del sistema máquina-cimentación coincidiendo con el centro de gravedad del área de contacto que proyectan un eje vertical z.

Considerando el momento en la base de cimentación  $M_{mo}$  se expresa en la ecuación 70, para posteriormente determinar el valor del coeficiente de relación en la ecuación 71:

$$M_{mo} = M_m + mL^2 \quad \text{Ec. 70}$$

$$\frac{M_m}{M_{mo}} = \gamma (\gamma < 1) \quad \text{Ec. 71}$$

Dónde:

$M_{mo}$  = Momento de inercia de la masa de la máquina y la cimentación alrededor del eje horizontal.

$M_m$  = Momento de inercia de masa de la máquina y la cimentación alrededor del eje Y

$m$  = Masa de la maquina [t-s<sup>2</sup>/m]

$L$  = Semi-largo de la geometría de la cimentación. [m]

$\gamma$  = Coeficiente de relación entre momentos de inercia de masa de la máquina y la cimentación.

#### 5.1.5.6.1 Frecuencias naturales del sistema

Mediante la ecuación 72 cuadrática se presenta dos frecuencias naturales del sistema expresadas ( $\omega_{n1}$  y  $\omega_{n2}$ ):

$$\omega_{n1,2}^2 = \frac{1}{2\gamma} \left[ \omega_{n\phi}^2 + \omega_{nx}^2 \pm \sqrt{(\omega_{n\phi}^2 + \omega_{nx}^2)^2 - 4\gamma\omega_{n\phi}^2\omega_{nx}^2} \right] \quad \text{Ec. 72}$$

#### 5.1.5.6.2 Amplitudes de movimiento del sistema

Comenzando con una carga horizontal aplicada e incluyéndola como se presenta en la figura 42 y con los resultados obtenidos de las frecuencias naturales determinadas en la ecuación cuadrática 72 se procede al cálculo de la siguiente expresión en la ecuación 73:

$$mM_m(\omega_{n1}^2 - \omega^2)(\omega_{n2}^2 - \omega^2) = \Delta(\omega^2) \quad \text{Ec.73}$$

El giro que se produce por las vibraciones simultáneas del sistema alrededor del eje y se expresa en la ecuación 74:

$$A_{\phi s} = \frac{C_\tau AL}{\Delta(\omega^2)} P_x \quad \text{Ec.74}$$

La amplitud horizontal en x producido por las vibraciones simultáneas del sistema se las determina por la ecuación 75:

$$A_{xs} = \frac{C_\tau AL^2 + C_\phi I - WL - M_m \omega^2}{\Delta(\omega^2)} P_x \quad \text{Ec. 75}$$

Todas las ecuaciones planteadas hasta esta parte servirán para los cálculos necesarios en este proyecto y lograr tener una comprobación óptima para su desempeño como cimentación

Ahora si nos enfocamos solamente en el momento producido por cabeceo, analizaremos las ecuaciones 76 y 77:

$$A_{xc} = \frac{C_\tau AL}{\Delta(\omega^2)} M_y \quad \text{Ec. 76}$$

$$A_{\phi c} = \frac{C_\tau A - m\omega^2}{\Delta(\omega^2)} M_y \quad \text{Ec. 77}$$

Hasta el momento determinamos las ecuaciones tanto de las amplitudes horizontales como de cabeceo por separado, ahora lo haremos cuando los dos efectos actúan simultáneamente en el sistema, dando amplitudes en las ecuaciones 78 y 79:

$$A_{xt} = \frac{(C_\tau AL^2 + C_\phi I - WL - M_m \omega^2) P_x + (C_\tau AL) M_y}{\Delta(\omega^2)} \quad \text{Ec. 78}$$

$$A_{\phi t} = \frac{(C_\tau AL) P_x + (C_\tau A - m\omega^2) M_y}{\Delta(\omega^2)} \quad \text{Ec. 79}$$

## **5.2 REVISIÓN DE NORMAS DE DISEÑO DE CIMENTACIONES PARA CARGAS DINÁMICAS**

Partimos de la consideración que es establecida por el ACI 351 en la que se describe un criterio fundamental de vibraciones producidas en cimentaciones de máquinas sometidas a cargas dinámicas, en la que su mayor propósito es limitar las acciones de movimiento, las cargas internas y las tensiones dentro del equipo para que de esta forma se logre evitar afectaciones a máquinas vecinas o personal sensibles a la acción de estas.

Por tal motivo a continuación describiremos todos los estados límites presentados por las normas que nos permitan satisfacer las condiciones de estabilidad de la subestructura.

### **5.2.1 ESTADO LÍMITE DE FALLA DEL SUELO**

Para que el suelo se comporte de la manera más adecuada frente a los efectos producidos por el sistema máquina-cimentación comprendidos entre requerimientos estáticos y dinámicos se debe mantener una resistencia al corte que no sobrepase los estados límites de falla establecidos bajo los parámetros de las normas que los rigen. Esta resistencia al corte se lo determina generando parámetros fundamentales del suelo de desplante mediante procesos de exploración del terreno en estudio.

### **5.2.2 ESTADO LÍMITE DE FALLA DE LA CIMENTACIÓN**

La cimentación al ser una estructura como cualquier otra, requiere de un estudio de diseño que logre impedir los estados límites de falla enfocados a la flexión, cortante y torsión del elemento siguiendo los lineamientos y especificaciones del código NEC 2015 de la construcción. Todos estos estados límites serán analizados a través de la ejecución del software SAP 2000 para el diseño de estas cimentaciones considerando todos sus parámetros y solicitaciones de fuerzas que intervengan en el sistema.

### **5.2.3 ESTADOS LÍMITES DE SERVICIO POR VIBRACIÓN DE MAQUINARIA**

Este tipo de estado límite es muy necesario debido a las exigencias que presenta la máquina en el momento de su operación ya que intervienen en su entorno varios factores que pueden ser perjudicados por la máquina o viceversa, lo más preocupante de estos límites se debe a que si la máquina se somete a grandes vibraciones se produciría un movimiento fuerte o amplitudes excesivas lo que provocaría destrozos a si misma o a equipos cercanos, otras afectaciones que

podría generar este efecto sería el desgaste progresivo de la vida útil tanto de la máquina como de su cimentación; para mitigar en gran medida estos resultados el fabricante del equipo debe diseñar la máquina de tal manera que evite el movimiento exagerado.

Por nuestra parte para la cimentación utilizaremos el siguiente gráfico que nos presenta los valores de amplitud del desplazamiento en correspondencia a la frecuencia, para que de esta forma poder evaluar la respuesta dinámica del sistema máquina-cimentación-suelo.

En la figura 43 se observa una variedad de curvas que representan los límites de vibraciones permitidas para seres humanos que van desde “no percibido por las personas” hasta “severo” y rangos superiores que relacionan los efectos de la máquina sobre estructuras o equipos cercanos que puedan ser afectados por ellas.

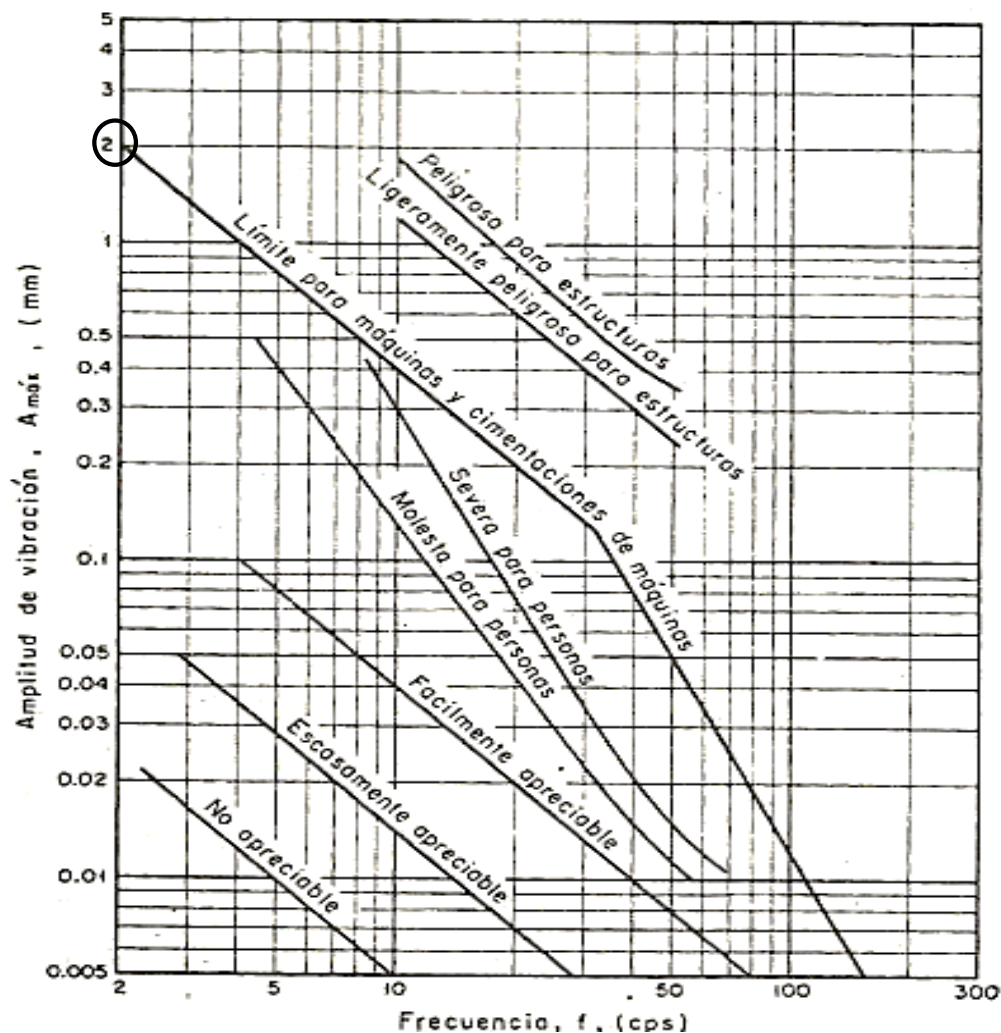


Figura 43 Límites de amplitud del deslizamiento en función de la frecuencia.

Fuente: ACI Richart, Hall y Woods; 1970

En este caso para la ejecución del proyecto que consta en el diseño de las cimentaciones para las máquinas que se emplearán en la planta industrial de NOVACERO, se consideró tomar como límite máximo de amplitud de vibración 2 mm, que es el límite normalizado para cimentaciones de máquinas con niveles bajos de frecuencia de operación presentado en la figura 43.

#### 5.2.4 ESTADO LÍMITE POR RESONANCIA

El término resonancia fue expresado anteriormente en este documento por tal motivo podemos entender que es de suma importancia evitar este tipo de estado, ya que podría generar mucha amenaza al sistema máquina-cimentación.

Como lo revisamos anteriormente la resonancia es un fenómeno producido cuando la frecuencia natural del sistema máquina-cimentación se iguala con la frecuencia de operación de la máquina, en este caso con la ayuda de la figura 44 desarrollada por investigadores de la norma ACI 351, podremos orientarnos para lograr evitar este fenómeno mediante un rango límite como se muestra:

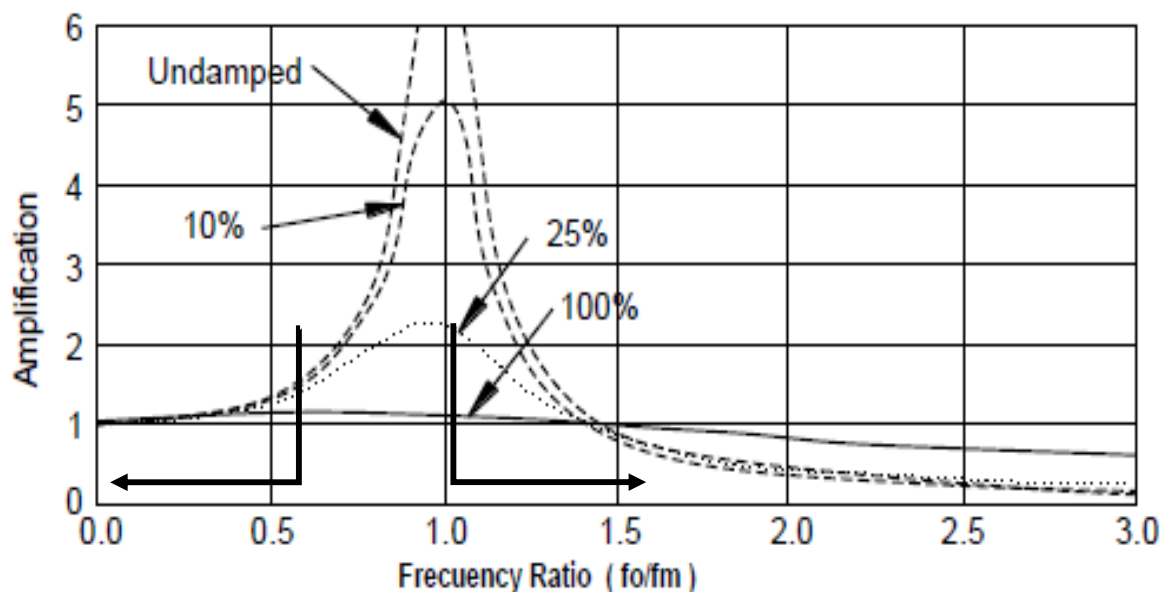


Figura 44 Fenómeno de resonancia

Fuente: ACI Richart, Hall y Woods; 1970

Tomando como referencia la figura 44, podemos notar que la resonancia se incrementa a medida que la relación de frecuencias se aproxima a la unidad, causando amplitudes cada vez mayores que por ende afectarán tarde o temprano la estructura.



Ahora, si nuestra intención es evitar este fenómeno tendremos que marcar límites de resonancia, para tal propósito algunos investigadores plantean un rango de la relación de frecuencias para garantizar el diseño del proyecto, la siguiente ecuación presentará lo expuesto:

$$0.8 \geq \frac{f_o}{f_m} \geq 1.2 \quad \text{Ec.80}$$

Dónde:

$f_o$  = Frecuencia de la máquina en RPM (Generalmente proporcionada por el fabricante)

$f_m$  = Frecuencia del sistema máquina-cimentación

Como se puede observar en la ecuación 80, se presenta un rango para garantizar la desigualdad, la relación de frecuencias debe tener un valor por debajo de 0.8 o por arriba de 1.2 ya que de esta forma el diseñador se asegura de que el sistema no presente una resonancia perjudicial para las cimentaciones.

### **5.2.5 ESTADO LÍMITE POR TRANSMISIÓN DE VIBRACIONES**

Dentro de la planta de NOVACERO, operan otros tipos de maquinaria como lo vimos en capítulos anteriores, que dependiendo de su funcionalidad presentan un mayor o menor incremento de vibraciones, por lo que este estado es necesario para limitar por completo los efectos de las vibraciones de estos equipos e impedir que los equipos cercanos no resulten afectados ni tampoco las estructuras vecinas.

## **5.3 PARÁMETROS DE DISEÑO DEL SUELO DE CIMENTACIÓN**

Durante muchos años, investigadores especialistas en suelos han ido desarrollando varios procedimientos para determinar los efectos del terreno frente a cargas dinámicas, para tales procedimientos es necesario la obtención de propiedades fundamentales de la dinámica del suelo que pueden ser conocidas mediante varias técnicas de investigación tanto en laboratorio como en campo.

Estas técnicas en las que se trabaja, fueron determinadas en este proyecto tanto la parte de laboratorio como la de campo, con la exploración y análisis del terreno mediante perforaciones SPT generadas en la zona de estudio y con las que podemos conocer muchos de estas propiedades del suelo que serán expresadas a continuación.

### **5.3.1 TRABAJO DE CAMPO**

Como se mencionó en capítulos anteriores se realizaron tres perforaciones denominadas PGN2-1, PGN2-2 y PGN2-3, de 6 metros de profundidad las cuales fueron ubicadas con el fin de cubrir

la mayor parte del área y poder garantizar los resultados de mejor manera, y así obtener los parámetros geotécnicos afines al proyecto.

Durante la ejecución de las perforaciones, se realizaron ensayos de penetración estándar con el equipo normalizado a cada metro de profundidad, y recuperación de muestras alteradas; de esta forma se logró obtener indirectamente la resistencia del suelo y se pudo caracterizar los estratos encontrados.

Como medida de garantizar su trabajo se realizaron registros fotográficos de las perforaciones donde consta el inicio y fin de cada sondeo, con sus respectivas muestras (Figura 45).



*Figura 45 Inicio de la perforación*

**Fuente: INGEOPAV**

En los anexos presentados al final del trabajo se presentará los resultados de las perforaciones y las características de los suelos encontrados en el estudio.

La descripción del subsuelo encontrado en el lugar del proyecto se realiza con base a los resultados de las perforaciones antes mencionadas, y con los ensayos de laboratorio ejecutados en la muestra recuperada.

Los resultados en los tres sondeos son muy similares; bajo la superficie del terreno del proyecto se tienen suelos clasificados como arenas de grano fino a grueso con gravas y matriz limosa, de compacidad de medianamente densa hasta muy densa, con un estrato intermedio de gravas y arenas

con poca matriz limosa de compacidad medianamente densa a densa. En el ensayo de penetración estándar, se encontraron resistencias que varían desde los 13 hasta los 52 golpes en la arena y entre 10 y 36 golpes en la grava/arena.

En todos los sondeos se encontró la presencia de nivel freático entre los 3 y 5,5 m de profundidad aproximadamente.

El perfil estratigráfico, trazado en base a los resultados de los sondeos y a los ensayos de laboratorio, se presentan en los anexos.

### **5.3.2 TRABAJOS DE LABORATORIO**

Una vez realizadas las perforaciones en cada uno de los puntos designados se seleccionó las muestras para los ensayos de laboratorio a través de una clasificación manual visual del terreno y así lograr determinar todas las características físicas posibles y clasificarlas según el reglamento en el sistema SUCS.

A continuación, se presenta una lista de los ensayos realizados para estas muestras y las respectivas normativas vigentes:

- |  |                          |
|--|--------------------------|
| - Ensayo de penetración estándar (SPT) | Norma ASTM D 158-84      |
| - Contenido de agua                    | Norma ASTM D 2216        |
| - Granulometría                        | Norma ASTM C 136 y D 422 |
| - Límite líquido y plástico            | Norma ASTM D 4318        |

Los resultados obtenidos servirán como base para la determinación de otras características físicas del terreno útiles para los cálculos empleados y presentados en los anexos finales.

### **5.3.3 EVALUACIÓN DE CAPACIDAD DE CARGA**

Uno de los parámetros de los suelos más importantes a la hora de diseñar cualquier cimentación es la capacidad del suelo para soportar las más altas cargas que se generan, con esta premisa nos encontramos en la necesidad de determinar la capacidad ultima y la carga admisible con ayuda de ecuaciones establecidas por Meyerhof (1963), las mismas que relacionan los parámetros fundamentales de un suelo de cimentación y factores que intervienen en la relación suelo-cimentación. Además, se revisará dos condiciones de capacidad de carga admisible para las cimentaciones en estudio, la primera considerando los parámetros de Meyerhof y la segunda considerando asentamientos admisibles para posteriormente elegir la más desfavorable. Todo esto se presenta en detalle a continuación:

### 5.3.3.1 ECUACIÓN GENERAL DE LA CAPACIDAD DE CARGA

La ecuación 81 que se presentará es una reconstrucción de las ecuaciones establecidas por Terzaghi para cimentaciones continuas, cuadradas y circulares, por la cuales Meyerhof introdujo otros factores como la resistencia cortante a lo largo de la superficie de falla en el suelo de desplante, las posibles cargas inclinadas en la cimentación y los diferentes factores que se irán describiendo en su ecuación.

$$q_u = cN_cF_{cs}F_{cd}F_{ci} + qN_qF_{qs}F_{qd}F_{qi} + \frac{1}{2}\gamma BN_\gamma F_{\gamma s}F_{\gamma d}F_{\gamma i} \quad \text{Ec. 81}$$

Dónde:

$c$  = Cohesión

$q$  = Esfuerzo efectivo al nivel del fondo de la cimentación

$\gamma$  = Peso Específico del suelo

$B$  = Ancho de la cimentación

$F_{cs}, F_{qs}, F_{\gamma s}$  = Factores de forma

$F_{cd}, F_{qd}, F_{\gamma d}$  = Factores de profundidad

$F_{ci}, F_{qi}, F_{\gamma i}$  = Factores de inclinación de la carga

$N_c, N_q, N_\gamma$  = Factores de Capacidad de carga

#### 5.3.3.1.1 Factores de la capacidad de carga

Los factores de capacidad de carga son expresiones obtenidas por Terzaghi a lo largo de sus investigaciones sobre la capacidad de carga en suelos bajo una cimentación rígida, el propósito de estos factores en la ecuación como él lo dijo “**es representar la naturaleza básica de la superficie de falla en los suelos**” (BRAJA M. DAS & G.V. RAMANA, 2011, 1993, pág. 167). Por lo general estas expresiones están únicamente en función del ángulo de fricción del suelo ( $\phi$ ) y se las determina en base a las ecuaciones 82, 83 y 84:

$$N_q = \tan^2 \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right) e^{\pi \tan \phi} \quad \text{Ec. 82}$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot \phi \quad \text{Ec. 83}$$

$$N_\gamma = 2(N_q + 1) \tan \phi \quad \text{Ec. 84}$$

### 5.3.3.1.2 Factores de forma, profundidad e inclinación

Las ecuaciones para la determinación de los factores de forma, profundidad e inclinación presentes en la ecuación de capacidad de carga de Meyerhof se muestran en la tabla 3 con sus respectivas fuentes de investigación.

Tabla 3 Factores de forma, profundidad e inclinación recomendados para su uso

Factor	Relación	Fuente
<i>Forma<sup>a</sup></i>	$F_{cs} = 1 + \frac{B}{L} \frac{N_q}{N_c}$ $F_{qs} = 1 + \frac{B}{L \tan \phi}$ $F_{\gamma s} = 1 - 0.4 \frac{B}{L}$ <p>donde <math>L</math>=longitud de cimentación (<math>L &gt; B</math>)</p>	De Beer (1970) Hansen (1970)
<i>Profundidad<sup>b</sup></i>	<p>Condición (a): <math>D_f/B \leq 1</math></p> $F_{cd} = 1 + 0.4 \frac{D_f}{B}$ $F_{qd} = 1 + 2 \tan \phi (1 - \sin \phi)^2 \frac{D_f}{B}$ $F_{\gamma d} = 1$ <p>Condición (b): <math>D_f/B &gt; 1</math></p> $F_{cd} = 1 + (0.4) \tan^{-1} \left( \frac{D_f}{B} \right)$ $F_{qd} = 1 + 2 \tan \phi (1 - \sin \phi)^2 \tan^{-1} \left( \frac{D_f}{B} \right)$ $F_{\gamma d} = 1$	Hansen (1970)
<i>Inclinación</i>	$F_{ci} = F_{qi} = \left( 1 - \frac{\beta^\circ}{90^\circ} \right)^2$ $F_{\gamma i} = \left( 1 - \frac{\beta}{\phi} \right)^2$ <p>donde <math>\beta</math> = inclinación de la carga sobre la cimentación con respecto a la vertical</p>	Meyerhof (1963); Hanna y Meyerhof (1981)
<p><i>a</i> = Estos factores de forma son relaciones empíricas basadas en numerosas pruebas de laboratorio.  <i>b</i> = El factor <math>\tan^{-1}(D_f/B)</math> está en radianes.</p>		

Fuente: Braja.M. Das, 1993

Considerando una medida de seguridad en los cálculos de la capacidad de carga última, la mayoría de los ingenieros incorporan al resultado de la capacidad de suelo un factor de seguridad que en todos los casos presenta un valor de 3 ya que esto ayudará a corregir posibles variaciones que se susciten a lo largo de la ejecución de la obra; este factor se lo implementa mediante la ecuación 85:

$$q_{adm} = \frac{q_u}{FS} \quad \text{Ec. 85}$$

Dónde:

$q_{adm}$  = Capacidad de carga admisible

$q_u$  = Capacidad de carga última

FS = Factor de seguridad

### 5.3.3.2 *Capacidad Permisible de carga en arenas basada en consideraciones de asentamientos*

Si consideramos las investigaciones de campo realizadas para este proyecto en base a las características del suelo, observamos que el terreno se encuentra conformado en un gran porcentaje de arena, por lo cual, se ha optado por utilizar la correlación original establecida por Meyerhof (1965) en la cual relaciona la resistencia de penetración estándar corregida ( $N_{corr}$ ) con la presión de carga admisible en cimentaciones y sugirió que debería ser incrementada un 50% debido a que en las relaciones empíricas la resistencia a la penetración refleja la localización del nivel de agua freática. En virtud a estas consideraciones el investigador Bowles (1977) manifestó que las modificaciones de estas relaciones se lo podían expresar en las ecuaciones 86, 87 y 88:

$$q_{neta(adm)} \left( \frac{kN}{m^2} \right) = 19.16 N_{corr} F_d \left( \frac{s_e}{25.4} \right) \quad (para B \leq 1.22 \text{ m}) \quad \text{Ec. 86}$$

$$q_{neta(adm)} \left( \frac{kN}{m^2} \right) = 11.98 N_{corr} \left( \frac{3.28B+1}{3.28B} \right)^2 F_d \left( \frac{s_e}{25.4} \right) \quad (para B > 1.22 \text{ m}) \quad \text{Ec. 87}$$

Dónde:

$$F_d = factor = 1 + 0.33 \left( \frac{D_f}{B} \right) \leq 1.33 \quad \text{Ec.88}$$

$S_e$  = asentamiento tolerable, en mm

Dónde:

$q_{neta(adm)}$  = Capacidad de carga neta admisible

$N_{cor}$  = Resistencia de penetración estándar corregida

$D_f$  = Profundidad de desplante de la cimentación

B = ancho de la cimentación

### 5.3.3.3 **PARÁMETROS Y MÓDULOS DINÁMICOS DEL SUELO NECESARIOS**

#### **PARA EL PROYECTO**

Además de los parámetros obtenidos en los ensayos de campo y laboratorio del suelo de este proyecto, es necesario determinar parámetros dinámicos adicionales que generan las máquinas y que interactúan con el terreno; dentro de estos factores tenemos el módulo dinámico de corte, la relación de poisson y velocidades de ondas de corte del suelo, todas estas obtenidas mediante ecuaciones empíricas que poseen una correlación con sus otros factores.

#### 5.3.3.3.1 **Relación de Poisson**

Esta es una propiedad de los suelos en la cual se presenta una relación entre una carga aplicada al suelo sometido a compresión y las deformaciones laterales y transversales que se producen a causa de la carga mencionada. En la tabla 4 se presentan valores recomendados para diseño en función del tipo de material del que está conformado el suelo en estudio.

*Tabla 4 Rango de valores típicos de la relación de poisson*

Material	Comportamiento	Relación de Poisson ( $\mu$ )
Arcilla saturada	No drenado	0,5
Arcilla parcialmente saturada		0,2 - 0,4
Arena densa	Drenado	0,3 - 0,4
Arena suelta		0,1 - 0,3

**Fuente: Kulhawy y Mayne, 1990**

Con lo cual, para el diseño de las cimentaciones de este proyecto en base a que el suelo presenta una composición de arena con una pequeña matriz limosa de medianamente densa a densa, se ha precisado seleccionar un valor de 0,33 para los cálculos en estudio.

#### 5.3.3.3.2 Modulo dinámico de corte máximo

El módulo dinámico de corte es una propiedad de los suelos ocasionada por la aplicación de una carga cíclica proveniente de un terremoto o maquinarias que provocan al suelo un comportamiento tenso-deformacional que pertenece a una curva de histéresis de tensión vs deformación de corte(ver figura 46); en la mayoría de los casos esta propiedad es obtenida mediante ensayos de laboratorio y de campo, pero debido a que, en este proyecto no se lo realizó al momento de la exploración, se ha optado por determinarlo en base a las relaciones que presenta entre las velocidades de onda de corte del suelo en estudio y de la densidad de la masa del suelo expresados en la ecuación 89:

$$V_s = \sqrt{\frac{G_{max}}{\rho}}$$

Ec. 89

Dónde:

$V_s$  = Velocidad de ondas de corte [m/s]

$\rho$  = Densidad de la masa del suelo

$G_{max}$  = Modulo dinámico de corte máximo

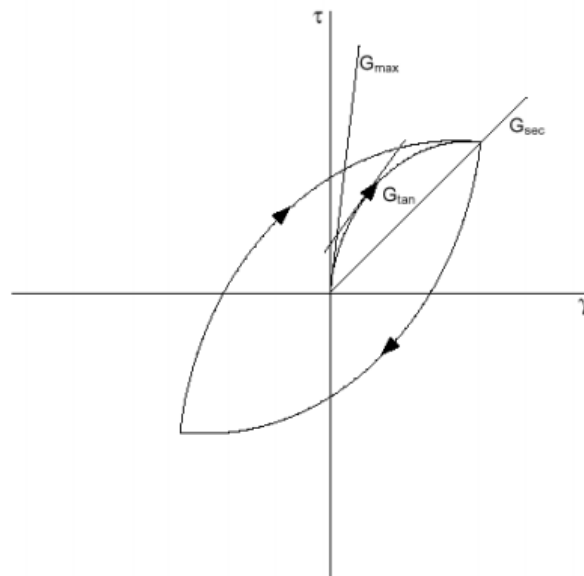


Figura 46 Ciclo de Histéresis

Fuente: Kramer, 1996



#### 5.3.3.3 Velocidad de ondas de corte

Este parámetro es considerado un punto clave al momento de realizar un análisis del comportamiento del suelo frente a vibraciones provocadas por respuestas sísmicas o del equipo en una empresa industrial. Frecuentemente esta característica de los suelos es determinada a través de ensayos o técnicas de reconocimiento de suelos, pero debido a su complejidad, muchos investigadores a lo largo del tiempo han logrado obtener correlaciones de este valor en función al número de golpes corregidos ( $N_{corr}$ ) en el ensayo de penetración estándar realizado muy a menudo en la exploración de suelos.

Para arenas la ecuación de correlación de este parámetro obtenida de las investigaciones realizadas por (Salvador Díaz del Castillo, 2007) es la ecuación 90:

$$V_s = 96(N_{corr})^{0.28} \quad \text{Ec. 90}$$

Dónde:

$V_s$  = Velocidad de ondas de corte [m/s]

$N_{corr}$  = Numero de golpes corregidos en el SPT

### 5.4 ASENTAMIENTOS TOLERABLES

Como hemos venido observando en capítulos anteriores relacionados a los asentamientos límites para un correcto funcionamiento del equipo, podemos notar que es de suma importancia que las máquinas no presenten asentamientos excesivos debido a las afectaciones que estas producen; en la empresa NOVACERO se solicitó que los asentamientos tolerables por petición del diseñador de la maquinaria sean no mayores de 6 mm debido a que estos equipos son parte de todo un sistema de fabricación y deben necesariamente trabajar conjuntamente con otras máquinas cercanas para realizar su cometido; en vista de que estos equipos son diseñados para poder movilizar a la materia prima que son las palanquillas trasladándolas de una posición a otra, si uno de ellos se encontrará desplazado por más de 6 mm con respecto a otro, esto se traduciría en un colapso del sistema ya que se presentaría obstrucciones para la palanquilla afectando así a la producción y a la operatividad de las máquinas.

## CAPITULO VI

### CÁLCULO Y DISEÑO DEL TIPO DE CIMENTACIÓN

Una vez que ya se realizó la recolección de datos y de todo el estudio realizado para la ejecución de las cimentaciones de este proyecto, se procederá a realizar los cálculos correspondientes a las máquinas tanto para el sistema de carga en caliente como para la mesa de enfriamiento galopante; por lo cual se procederá a realizar el diseño desarrollándolo con dos herramientas, primeramente a través de un programa realizado en Excel que seguirá la metodología presentada en estudio de los investigadores Dobry y Gazetas, de la misma forma se utilizará software comerciales como programas de elementos finitos, SAFE y SAP2000 a manera de complemento y de comparación en los procesos y metodologías.

#### 6.1 CÁLCULO DE CIMENTACIÓN UTILIZANDO EXCEL

##### 6.1.1 CÁLCULO DE CIMENTACIÓN PARA SISTEMA DE CARGA EN CALIENTE

A continuación, comenzaremos presentando la geometría de la cimentación para el sistema de carga en caliente, así como también datos importantes de las características del suelo para una determinación preliminar de la capacidad admisible del suelo:

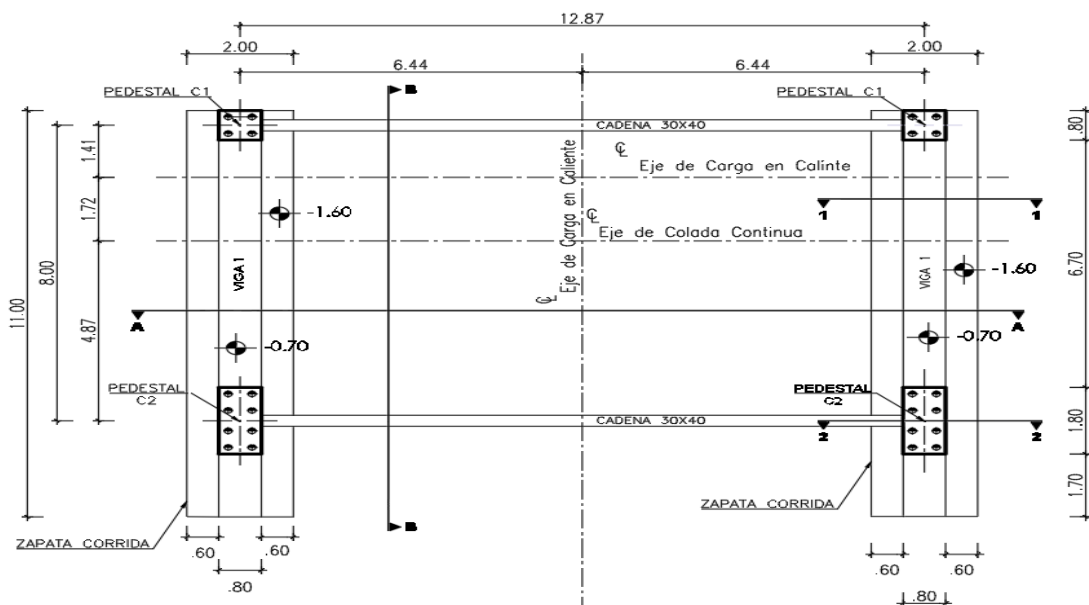


Figura 47 Cimentación en planta

Fuente: Autor

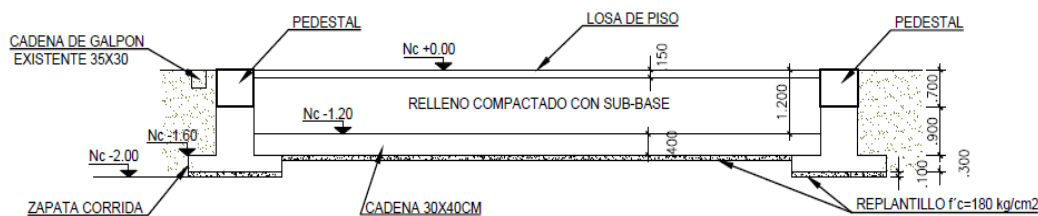


Figura 48 Corte A-A

Fuente: Autor

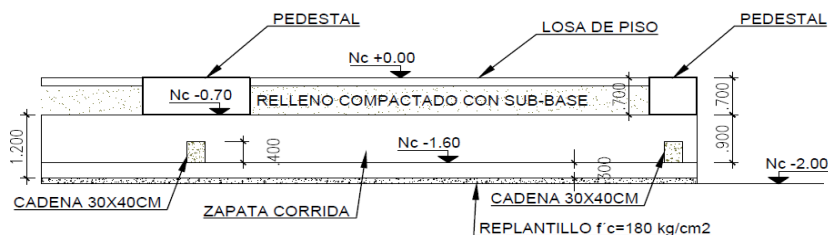


Figura 49 Corte B-B

Fuente: Autor

Datos obtenidos en campo y laboratorio de los parámetros del suelo:

Tabla 5 Parámetros del Suelo Obtenidos en Campo y Laboratorio del Sistema de C. en C.

Ancho de la cimentación	B'=	2	m
Largo de la cimentación	L'=	11	m
Peso unitario del suelo de desplante	$\gamma$ =	1.8	t/m <sup>3</sup>
Profundidad de cimentación	Df=	2	m
Angulo de fricción del suelo de cimentación	$\phi$ =	32	°
Cohesión del suelo de desplante	c=	6.63	t/m <sup>2</sup>
Numero de golpes corregido (SPT)	Ncor=	25	
Factor de seguridad de la cimentación	FS=	3	
Fuerza Vertical	V=	80	t
Fuerza Horizontal Dirección X	Tx=	40	t
Fuerza Horizontal Dirección Y	Ty=	15	t
Módulo de elasticidad del suelo de desplante	E=	2203	t/m <sup>2</sup>
Coeficiente de Poisson	$\mu$ =	0.3	
Área	A=	22	m <sup>2</sup>
Capacidad permisible	qp=	3.64	t/m <sup>2</sup>

Fuente: Autor

Determinación de la capacidad de carga mediante la ecuación general:

$$q_u = cN_cF_{cs}F_{cd}F_{ci} + qN_qF_{qs}F_{qd}F_{qi} + \frac{1}{2}\gamma B'N_\gamma F_{\gamma s}F_{\gamma d}F_{\gamma i}$$

Tabla 6 Factores de Capacidad de Carga, Forma, Profundidad e inclinación de la Cimentación de C. en C.

Factores de Capacidad de Carga		Factores de Forma, Profundidad e Inclinación					
		Forma		Profundidad	Inclinación		
Nc=	34.71	Fcs=	1.12	Fcd=	1.40	Fci=	0.50
Nq=	22.46	Fqs=	1.11	Fqd=	1.28	Fqi=	0.50
Nγ=	29.02	Fys=	0.93	Fyd=	1.00	Fyi=	0.03

Fuente: Autor

Tabla 7 Resultados de Capacidad Admisible de Cimentación de C. en C.

Capacidad Admisible sin FS	qu=	237.28	t/m <sup>2</sup>
Capacidad Admisible Neta	qadm=	79.09	t/m <sup>2</sup>

Fuente: Autor

Determinación de la capacidad admisible neta por asentamientos tolerables con la ecuación

87:

$$q_{neta(adm)} \left( \frac{kN}{m^2} \right) = 11.98 N_{cor} \left( \frac{3.28B' + 1}{3.28B'} \right)^2 F_d \left( \frac{s_e}{25.4} \right) \quad (para B' > 1.22m)$$

Asentamiento diferencial para las máquinas

St = 6 mm

Tabla 8 Capacidad Admisible por Asentamiento en Sistema de Carga en Caliente

Numero de golpes corregido (SPT)	Ncor=	25
Factor de ecuación	Fd=	1.33
Ancho de la cimentación	B'=	2 m
qn(adm)=		
	7.70	t/m <sup>2</sup>

Fuente: Autor

De estos dos resultados seleccionaremos el más bajo, que sería el último de 7,70 t/m<sup>2</sup>.

Posteriormente realizaremos el análisis de la cimentación dinámica para el sistema de carga en caliente, iniciando con una lista de los parámetros dinámicos del suelo de desplante y parámetros fundamentales del equipo.

Tabla 9 Parámetros Dinámicos del suelo de la Carga en Caliente

PARÁMETROS DINÁMICOS DEL SUELO			
Módulo dinámico de rigidez al corte	G=	10229.54	t/m <sup>2</sup>
Relación de poissón	$\nu$ =	0.3	
Peso volumétrico del suelo	$\gamma$ =	1.8	t/m <sup>3</sup>
La aceleración de la gravedad	g=	9.81	m/s <sup>2</sup>
Densidad de la masa del suelo	$\rho_0$ =	0.183	t.s <sup>2</sup> /m <sup>4</sup>
Velocidad de onda de corte	v=	236.43	m/s

Fuente: Autor

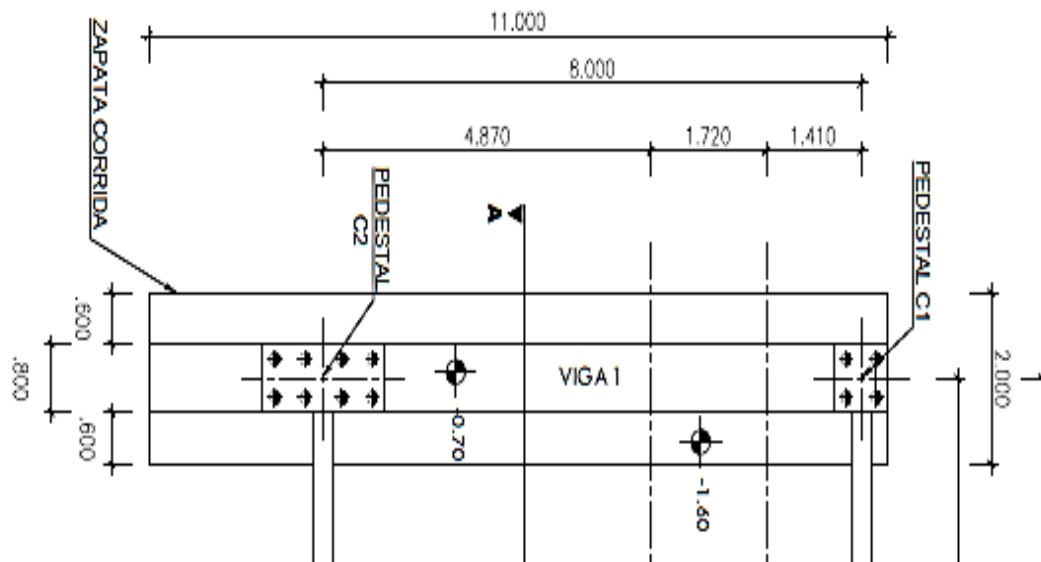


Figura 50 GEOMETRÍA DE CIMENTACIÓN

Fuente: Autor

Datos necesarios:

Tabla 10 Datos Necesarios para Cálculo de Coeficientes de Rigidez Dinámica en el Sistema de C. en C.

Área	A=	22	m <sup>2</sup>
Semi-ancho de la cimentación	L=	5.5	m
Semi-largo de la cimentación	B=	1	m
	L/B=	5.50	
	B/L=	0.18	
	$A/(4L^2)$ =	0.18	
Momento de inercia alrededor del eje x	I <sub>x</sub> =	7.33	m <sup>4</sup>
Momento de inercia alrededor del eje y	I <sub>y</sub> =	221.83	m <sup>4</sup>
Momento Polar de inercia de la base alrede. Vertical z	J <sub>z</sub> =	229.17	m <sup>4</sup>

Fuente: Autor

*Tabla 11 Parámetros de la máquina*

<b>Parámetros de la máquina presentadas por el fabricante</b>		
Peso del pedestal 2(Wp2)=	30	t
Peso del pedestal 1(Wp1)=	20	t
Peso total de la máquina(W)=	50	t
Velocidad de operación(fo)=	10	RPM
Frecuencia ( $\omega$ )= $2\pi(fo/60)$ =	1.05	rad/s

**Fuente: Autor**

$$a_0 = \frac{\omega B}{V_s}$$

$$a_0 = 0.004$$

Cálculo de los coeficientes de rigidez dinámicos:

Para la determinación de estos coeficientes de rigidez dinámico además de las ecuaciones planteadas en capítulos anteriores se elaboran las figuras 51, 52, 53 y 54 que fueron obtenidas en base a iteraciones para asemejar a las figuras planteadas por Dobry y Gazetas presentadas con anterioridad e incluidas en Excel para determinar de manera automática los parámetros dinámicos de las cimentaciones en estudio.

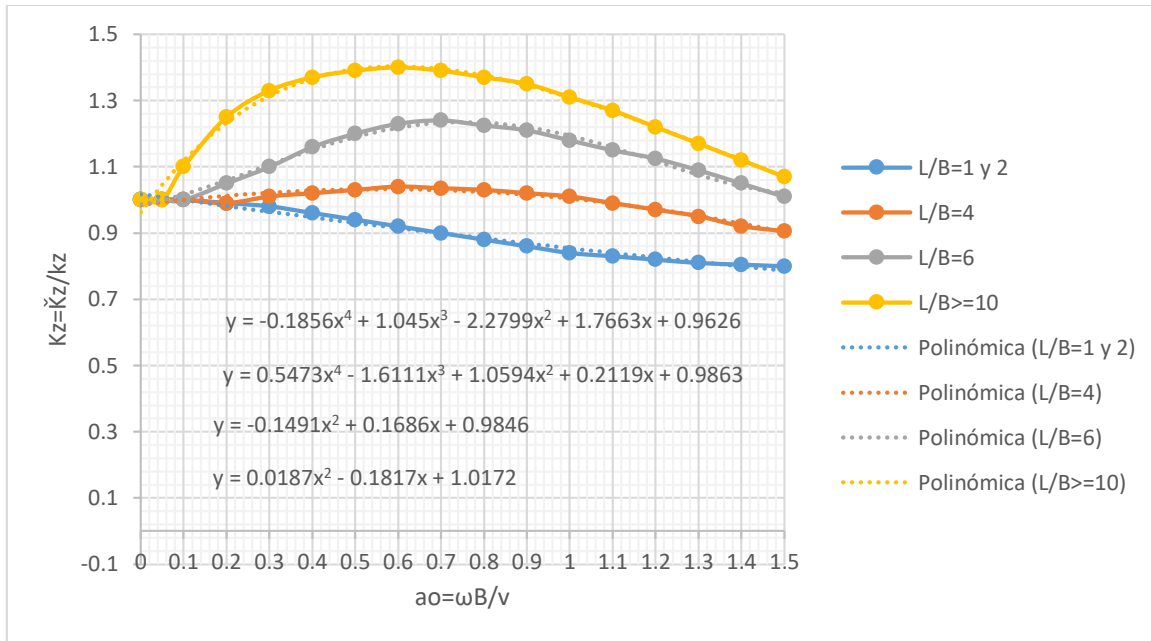


Figura 51 Coeficiente de rigidez vertical  $K_z$  contra diferentes formas geométricas de cimentación para suelo no saturado

Fuente: Autor

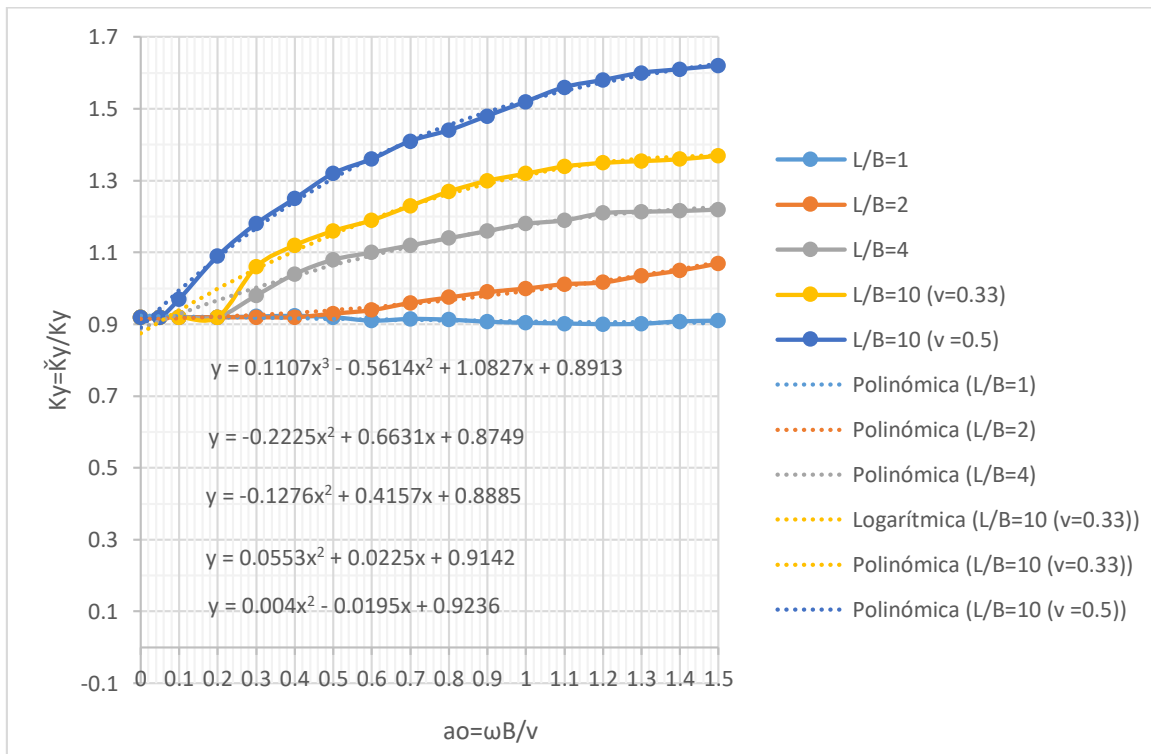


Figura 52 Rigidez dinámica horizontal de lado corto para diferente relaciones de L/B

Fuente: Autor

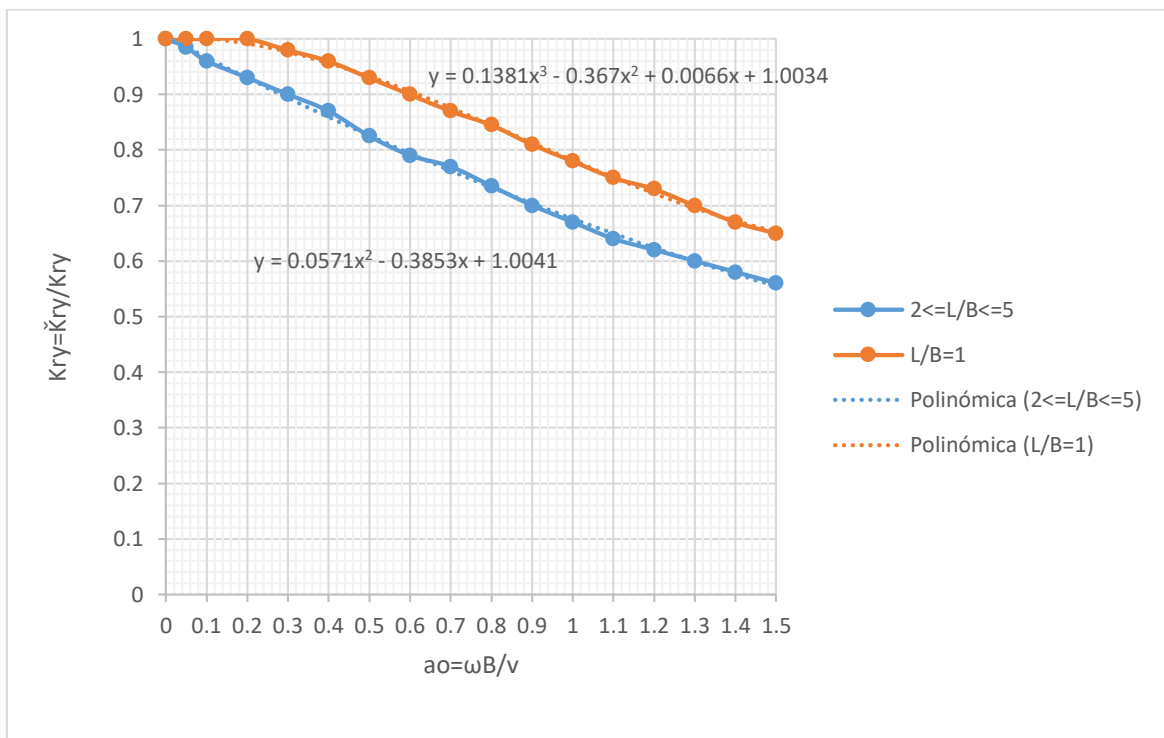
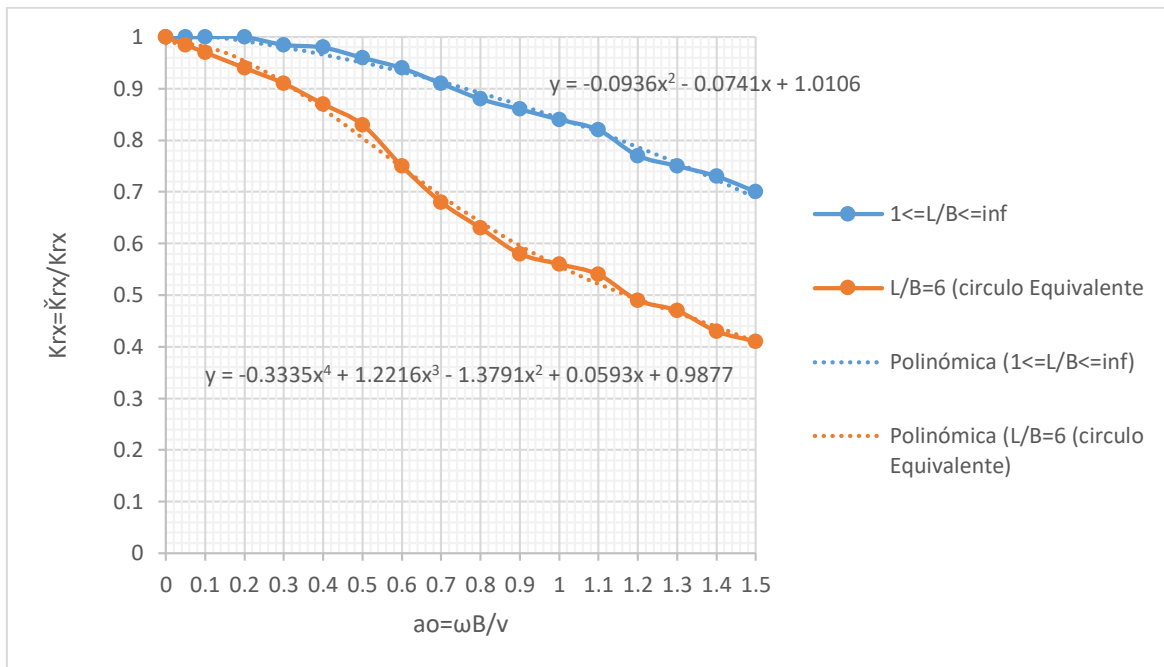


Figura 53 Rigidez dinámica por cabeceo en dirección del eje: (a) corto, (b) longitudinal para diferentes relaciones de  $L/B$

Fuente: Autor



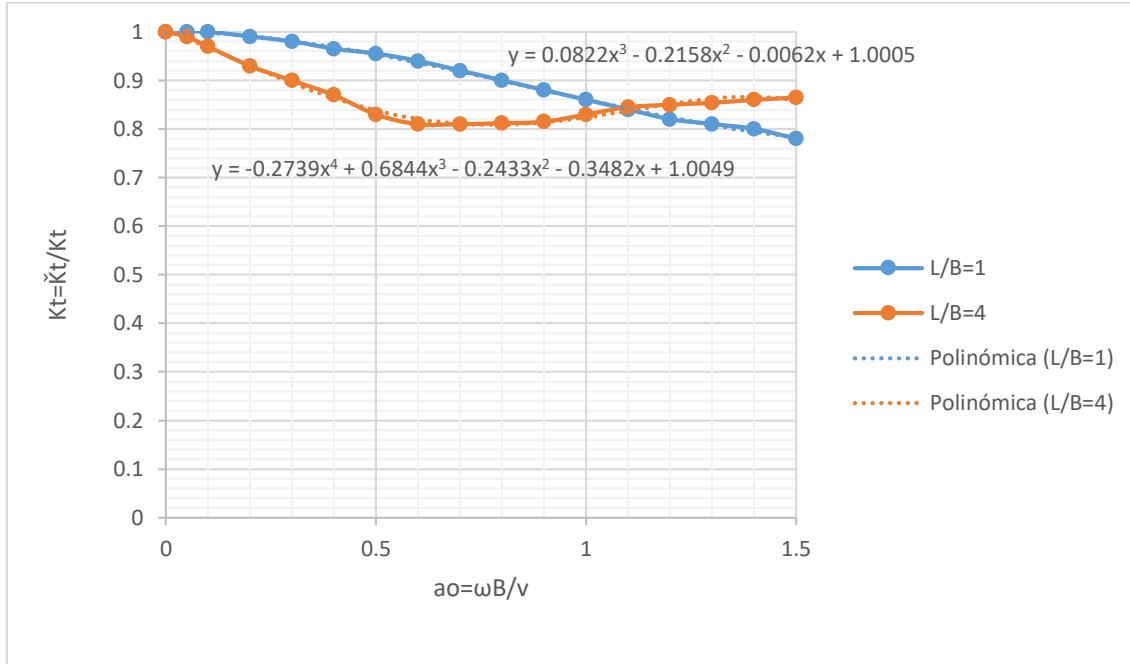


Figura 54 Rigidez torsional dinámica para diferentes formas de cimentación

Fuente: Autor

Tabla 12 Resultados de los Parámetros Dinámicos en el Sistema de Carga en Caliente

CUADRO DEL RESUMEN DE RESULTADOS					
A=	22	m <sup>2</sup>			
L'=	11	m	I <sub>x</sub> =	7.33	m <sup>4</sup>
B'=	2	m	I <sub>y</sub> =	221.83	m <sup>4</sup>
q <sub>a</sub> =	7.7	t/m <sup>2</sup>	$\bar{K}_z$ =	184026.8	t/m
γ=	1.8	t/m <sup>3</sup>	$\bar{K}_y$ =	139112.48	t/m
g=	9.81	m/s <sup>2</sup>	$\bar{K}_x$ =	117574.17	t/m
X <sub>m</sub> =	5.35	m	$\bar{K}_{rx}$ =	256585.57	t. m/rad
Y <sub>m</sub> =	1.00	m	$\bar{K}_{ry}$ =	3287172.23	t. m/rad
Z <sub>m</sub> =	1.13	m	$\bar{K}_t$ =	2303261.82	t. m/rad

Fuente: Autor

Coeficiente elástico del suelo uniforme a compresión

$$C_u = \frac{K_z}{A} = 8364.85 \quad \text{t/m}^3$$

Coeficiente elástico del suelo uniforme a cortante

$$C_{xy} = \frac{Kh_y}{A} = 6323.29 \quad \text{t/m}^3$$

Coeficiente elástico del suelo uniforme a cortante

$$C_{yx} = \frac{Kh_x}{A} = 5344.28 \quad \text{t/m}^3$$

Coeficiente elástico del suelo no uniforme a compresión

$$C_{\phi x} = \frac{K_{\phi x}}{I_x} = 34988.94 \quad \text{t/m}^3 \text{ rad}$$

Coeficiente elástico del suelo no uniforme a compresión

$$C_{\phi y} = \frac{K_{\phi y}}{I_y} = 14818.21 \quad \text{t/m}^2 \text{ rad}$$

Coeficiente elástico del suelo no uniforme a cortante

$$C_{\psi} = \frac{K_{\psi}}{J_z} = 10050.60 \quad \text{t/m}^3$$

Cálculo del momento de inercia de masa alrededor del eje z

Para la cimentación

$$M_{mcmz} = \frac{m}{12} [(2L)^2 + (2B)^2] = 40.71 \quad \text{t.m.s}^2$$

Para el pedestal 1

$$A = 0.7$$

$$B = 0.7$$

$$M_{mcz} = \frac{m}{12} [A^2 + B^2] = 0.17 \quad \text{t.m.s}^2$$

Para el pedestal 2

$$A = 0.7$$

$$B = 1.7$$

$$M_{mmz} = \frac{m}{12} [A^2 + B^2] = 0.86 \quad \text{t.m.s}^2$$

$$M_{mz} = M_{mcmz} + M_{mcz}$$

$$M_{mz} = 42 \quad \text{T.m.s}^2$$

*Figura 55 Cálculo de los Coeficientes elásticos del suelo en el Sistema de Carga en Caliente y Momentos de Masa*

**Fuente: Autor**

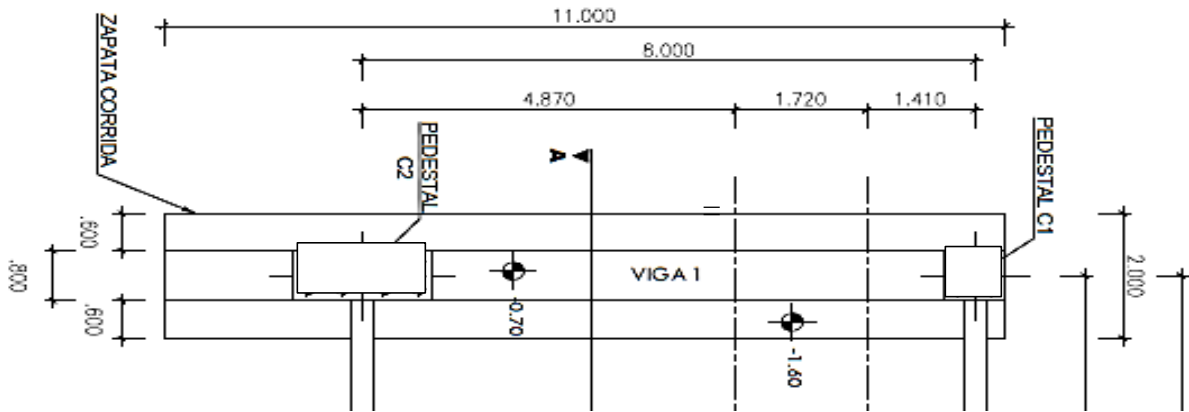


Figura 56 Seccionamiento de la Cimentación del Sistema de Carga en Caliente  
Fuente: Autor

Tabla 13 Determinación del Centro de gravedad del sistema de Carga en Caliente

Elementos	DIMENSIONES			PESO DEL ELEMENTO	MASA DEL ELEMENTO	CG DEL ELEMENTO					
	X(m)	Y(m)	Z(m)			xi(m)	yi(m)	zi(m)	mi xi	mi yi	mi zi
A	11	2	0.3	15.84	1.61	5.5	1	0.15	8.88	1.61	0.24
B	11	0.8	0.9	19.01	1.94	5.5	1	0.75	10.66	1.94	1.45
C	0.8	0.8	0.7	1.08	0.11	0.4	1	1.55	0.04	0.11	0.17
D	1.8	0.8	0.7	2.42	0.25	8.4	1	1.55	2.07	0.25	0.38
pedestal 1				20.00	2.04	0.4	1	1.55	0.82	2.04	3.16
pedestal 2				30	3.06	8.4	1	1.55	25.69	3.06	4.74
				88.34	9.01				48.16	9.01	10.15

Fuente: Autor

$$\begin{aligned}
 X_m &= 5.35\text{m} \\
 Y_m &= 1.00\text{m} \\
 Z_m &= 1.13\text{m} \\
 ex = L - X_m &= 0.15\text{m}
 \end{aligned}$$

Cálculo de Frecuencias naturales y amplitudes de vibración:

Momento de inercia de la masa alrededor del eje y:

$$M_{m0}^A = M_A \left[ \frac{a_{xa}^2 + a_{za}^2}{12} \right] + M_A \bar{Z}_{ia}^2 + M_A \bar{X}_{ia}^2$$

$$M_a = 16.37 \quad \text{t.m.s}^2$$

$$M_b = 20.80 \quad \text{t.m.s}^2$$

$$M_c = 2.96 \quad \text{t.m.s}^2$$

$$M_d = 2.97 \quad \text{t.m.s}^2$$

$$M_{p1} = 54.80 \quad \text{t.m.s}^2$$

$$M_{p2} = 35.84 \quad \text{t.m.s}^2$$

$$\Sigma \quad 133.74 \quad \text{t.m.s}^2$$

$$M_m =$$

$$M_{mp} = M_m + m (\bar{Z})^2$$

$$M_m = 122.30 \quad \text{t.m.s}^2$$

Figura 57 Momentos de Inercia de Masa en la Cimentación de Carga en Caliente

Fuente: Autor

Px	25	t
Py	10	t
Pz	50	t
Mz	0	t.m
My	55	t.m
Mx	20	t.m

Cu=	8395.68	t/m <sup>3</sup>	m=	9.01	t s <sup>2</sup> /m
Cøy=	34988.94	t/m <sup>3</sup>	ω=	1.05	rad/s
Cøx=	14818.21	t/m <sup>3</sup>	A=	22	m <sup>2</sup>
CTy=	6323.29	t/m <sup>3</sup>	Jz=	229.17	m <sup>4</sup>
CTx=	5344.28	t/m <sup>3</sup>			
Cψ=	10050.60	t/m <sup>3</sup>			

Figura 58 Parámetros Dinámicos de la Cimentación de Carga en Caliente

Fuente: Autor

# VIBRACION SIMULTÁNEA, DESLIZAMIENTO HORIZONTAL Y CABECEO ALRADEDOR

DEL EJE Z

$$\frac{M_m}{M_{mo}} = \gamma (\gamma < 1)$$

$$= 0.91$$

$$\omega_{n1,2}^2 = \frac{1}{2\gamma} \left[ \omega_{n\phi}^2 + \omega_{nx}^2 \pm \sqrt{(\omega_{n\phi}^2 + \omega_{nx}^2)^2 - 4\gamma \omega_{n\phi}^2 \omega_{nx}^2} \right]$$

$$\omega_{n1}^2 = 29091.11$$

$$\omega_{n2}^2 = 12062.14$$

$$\omega_{n1} = 170.56 \quad \text{rad/s}$$

$$\omega_{n2} = 109.83 \quad \text{rad/s}$$

$$mM_m(\omega_{n1}^2 - \omega^2)(\omega_{n2}^2 - \omega^2) = \Delta(\omega^2)$$

$$\Delta(\omega^2) = 3.86\text{E}+11$$

$$A_{\phi s} = \frac{C_r AL}{\Delta(\omega^2)} P_x$$

GIRO DE CIMENTACIÓN POR X

$$A_{\phi s} = 8.57\text{E}-6 \quad \text{rad} \quad Z_m = 1.13\text{m}$$

$$A_{xs} = \frac{C_r AL^2 + C_\phi I - WL - M_m \omega^2}{\Delta(\omega^2)} P_x$$

$$A_{xs} = 0.00022 \quad \text{m}$$

$$A_{xs} = 0.22 \quad \text{mm}$$

para el momento  $M_y$

$$A_{\phi c} = \frac{C_r A - m \omega^2}{\Delta(\omega^2)} M_y$$

$$A_{\phi c} = 1.67\text{E-}05 \quad \text{rad}$$

$$A_{xc} = \frac{C_r AL}{\Delta(\omega^2)} M_y$$

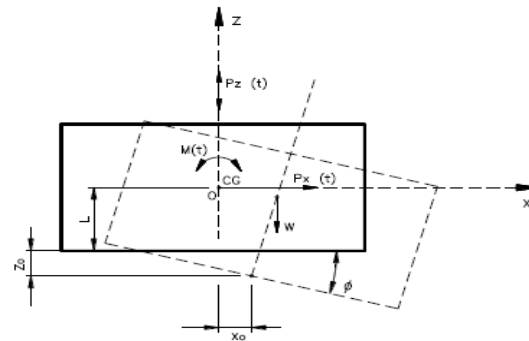
$$A_{xc} = 1.9\text{E-}05 \quad \text{m}$$

$$A_{xc} = 0.019 \quad \text{mm}$$

*Figura 59 Vibración Simultánea de Carga en Caliente*

**Fuente: Autor**

Combinación final de amplitudes de vibración y desplazamientos dinámicos combinados



$$A_{xt} = \frac{(C_r AL^2 + C_\phi I - WL - M_m \omega^2) P_x + (C_r AL) M_y}{\Delta(\omega^2)}$$

$$A_{xt} = 0.24 \text{ mm}$$

$$A_{\phi t} = \frac{(C_r AL) P_x + (C_r A - m \omega^2) M_y}{\Delta(\omega^2)}$$

$$A_{\phi t} = 2.53E-05 \text{ rad}$$

Figura 60 Combinación Final de Amplitudes del Sistema de Carga en Caliente

Fuente: Autor

Tabla 14 Resumen de resultados de frecuencias y amplitudes del sistema de Carga en Caliente

MODO	fm Frecuencia máquina $\omega$ (rad/s)	fo Frecuencia calculada $\omega c$ (rad/s)(ver anexos)	Revisión de resonancia fm/fo	Amplitud calculada mm (ver anexos)	Amplitud permisible mm	Observaciones
Vertical Z	1.05	142.95	0.0073	0.27	2	cumple
Horizontal X	1.05	114.26	0.0092	0.22	2	cumple
Horizontal Y	1.05	124.29	0.0084	0.07	2	cumple
Giro alrededor Y	1.05	156.78	0.0067	-	-	-
Giro alrededor X	1.05	43.79	0.0239	-	-	-
Torsión	1.05	234.90	0.0045	-	-	-

Fuente: Autor

Como podemos observar en la tabla 14, las frecuencias naturales calculadas del sistema con relación a la frecuencia de operación de la máquina son sumamente mayores, lo cual nos indica que las vibraciones que producirá el equipo cuando se encuentre en funcionamiento no producirá ninguna afectación en la cimentación diseñada. Además, las resonancias calculadas del sistema



son inferiores al estado límite por resonancia de 0.8 de manera que no presenta una resonancia perjudicial para la cimentación. En cuanto a las amplitudes calculadas son menores que la amplitud permisible estimada de 2 mm; incluso, las amplitudes de giro producidas por las vibraciones de cabeceo y torsional son tan pequeñas que se optó por despreciarlas. Las amplitudes presentes en los resultados reflejan que las mayores amplitudes que se generarán son en la dirección x, z, ya que son un indicativo del funcionamiento de la maquinaria.

### 6.1.2 CÁLCULO DE CIMENTACIÓN PARA MESA DE ENFRIAMIENTO

#### GALOPANTE

De la misma manera se realizará todos los cálculos planteados anteriormente:

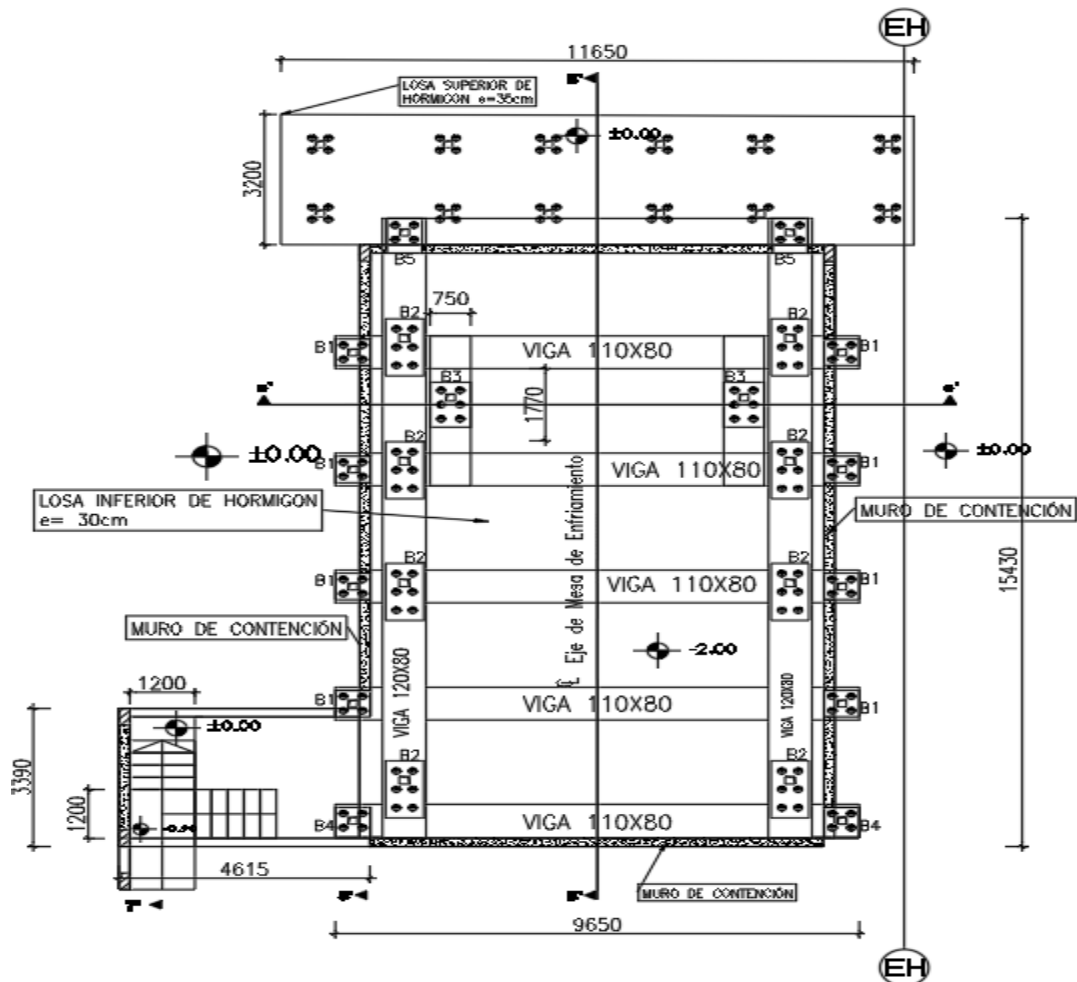


Figura 61 Cimentación en planta de mesa galopante

Fuente: Autor

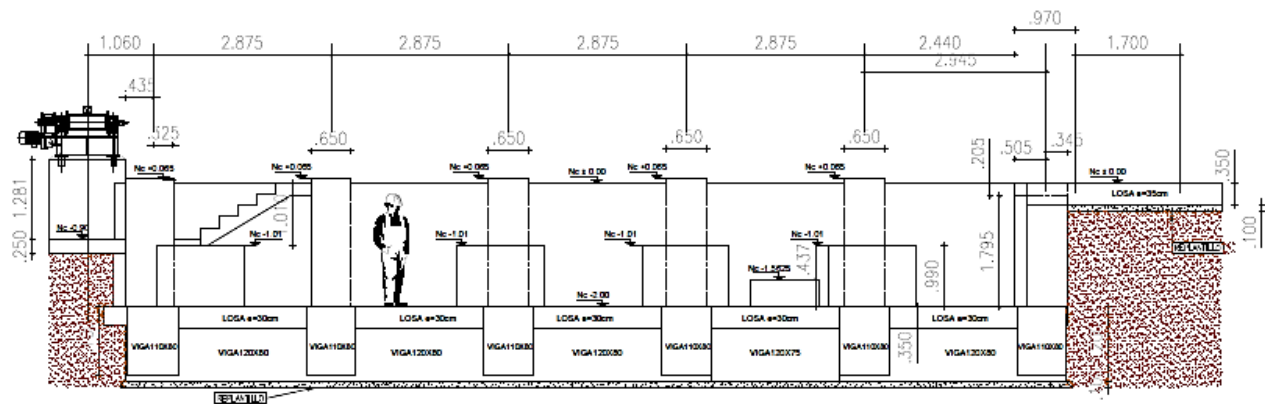


Figura 62 Corte B'-B'

Fuente: Autor

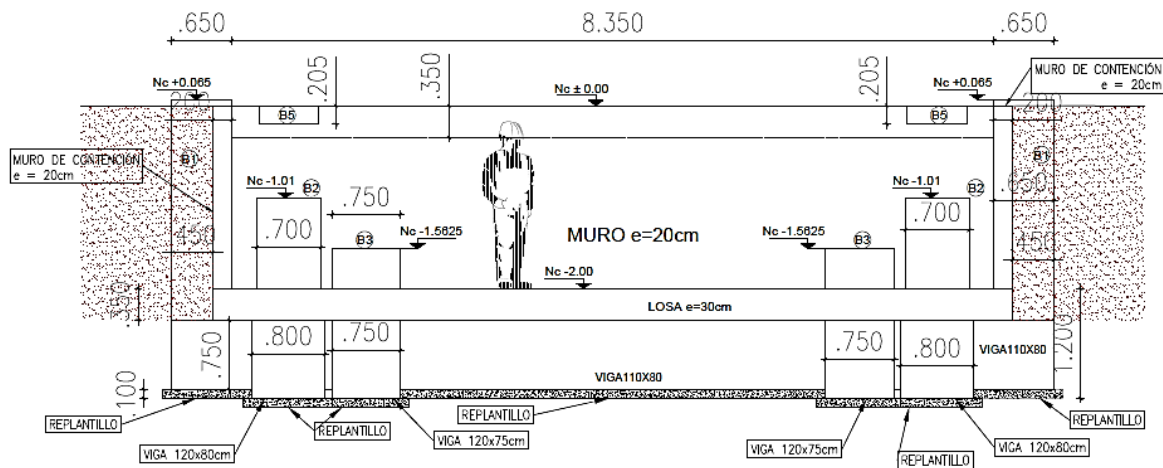


Figura 63 Corte C'-C'

Fuente: Autor

Datos obtenidos en campo y laboratorio de los parámetros del suelo:

Tabla 15 Parámetros del Suelo Obtenidos en Campo y Laboratorio de la Mesa de Enfriamiento

Ancho de la cimentación	B'=	9.65	m
Largo de la cimentación	L'=	15.43	m
Peso unitario del suelo de desplante	$\gamma$ =	1.8	t/m <sup>3</sup>
Profundidad de cimentación	Df=	2	m
Cohesión del suelo de desplante	c=	6.63	t/m <sup>2</sup>
Angulo de fricción del suelo de cimentación	$\phi$ =	32	°
Numero de golpes corregido (SPT)	Ncor=	25	

Factor de seguridad de la cimentación	FS=	3	
Fuerza Vertical	V=	810	t
Fuerza Horizontal Dirección X	Tx=	730	t
Fuerza Horizontal Dirección Y	Ty=	46	t
Módulo de elasticidad del suelo de desplante	E=	2203	t/m <sup>2</sup>
Coefficiente de Poisson	μ=	0.3	
Área	A=	148.90	m <sup>2</sup>
Capacidad permisible	qp=	5.44	t/m <sup>2</sup>

Fuente: Autor

Determinación de la capacidad de carga mediante la ecuación general:

$$q_u = cN_c F_{cs} F_{cd} F_{ci} + qN_q F_{qs} F_{qd} F_{qi} + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma F_{\gamma s} F_{\gamma d} F_{\gamma i}$$

Tabla 16 Factores de Capacidad de Carga, Forma, Profundidad e inclinación de la Cimentación de Mesa de Enfriamiento

Factores de Capacidad de Carga	Factores de Forma, Profundidad e Inclinación					
	Forma		Profundidad		Inclinación	
Nc= 34.71	Fcs=	1.40	Fcd=	1.08	Fci=	0.28
Nq= 22.46	Fqs=	1.39	Fqd=	1.06	Fqi=	0.28
Nγ= 29.02	Fys=	0.75	Fyd=	1.00	Fyi=	0.11

Fuente: Autor

Tabla 17 Resultados de Capacidad Admisible de Cimentación de la Mesa de Enfriamiento.

Capacidad Admisible sin FS	qu=	153.05	t/m <sup>2</sup>
Capacidad Admisible Neta	qadm=	51.02	t/m <sup>2</sup>

Fuente: Autor

Determinación de la capacidad admisible neta por asentamientos tolerables

$$q_{neta(adm)} \left( \frac{kN}{m^2} \right) = 11.98 N_{cor} \left( \frac{3.28B' + 1}{3.28B'} \right)^2 F_d \left( \frac{s_e}{25.4} \right) \quad (para B' > 1.22m)$$

Asentamiento diferencial para las máquinas

St = 6 mm

Tabla 18 Capacidad Admisible por Asentamiento en la Mesa de Enfriamiento.

Numero de golpes corregido (SPT)	Ncor=	25	
Factor de ecuación	Fd=	1.07	
Ancho de la cimentación	B'=	9.65	m
qn(adm)= 4.96 t/m <sup>2</sup>			

Fuente: Autor

De estos dos resultados seleccionaremos el más bajo, que sería el último de 4,96 t/m<sup>2</sup>.

Posteriormente realizaremos el análisis de la cimentación dinámica para el sistema de carga en caliente, iniciando con una lista de los parámetros dinámicos del suelo de desplante y parámetros fundamentales del equipo.

Tabla 19 Parámetros Dinámicos del suelo Mesa de enfriamiento

PARÁMETROS DINÁMICOS DEL SUELO			
Modulo dinámico de rigidez al corte	G=	10229.54	t/m <sup>2</sup>
Relación de poissón	v=	0.3	
Peso volumétrico del suelo	γ=	1.8	t/m <sup>3</sup>
La aceleración de la gravedad	g=	9.81	m/s <sup>2</sup>
Densidad de la masa del suelo	ρo=	0.183	t.s <sup>2</sup> /m <sup>4</sup>
Velocidad de onda de corte	v=	236.43	m/s

Fuente: Autor

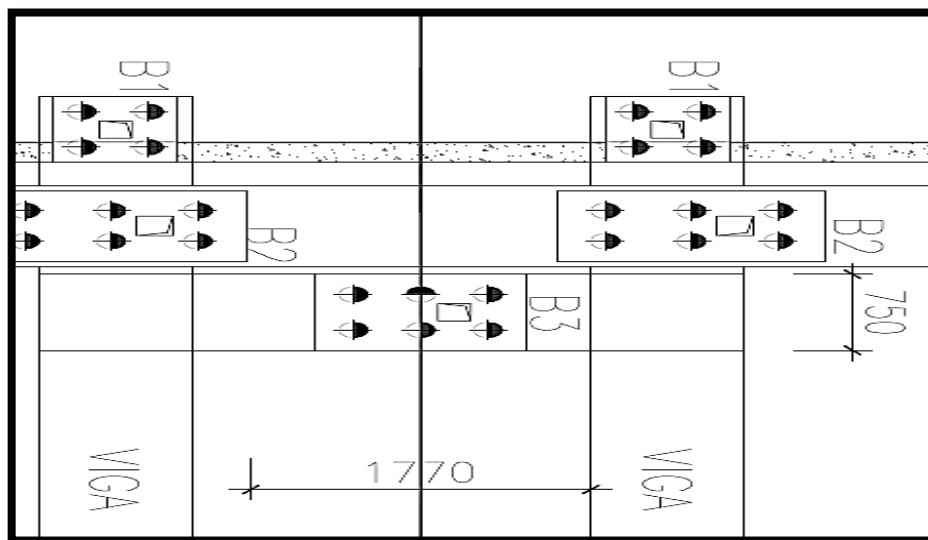


Figura 64 Geometría de la parte más crítica

Fuente: Autor

Tabla 20 Datos Necesarios para Cálculo de Coeficientes de Rigidez Dinámica en la Mesa de Enfriamiento.

Área	A=	1.33	m <sup>2</sup>
Semi-ancho de la cimentación	L=	7.72	m
Semi-largo de la cimentación	B=	4.82	m
	L/B=	2.36	
	B/L=	0.42	
	A/(4L <sup>2</sup> )=	0.42	
Momento de inercia alrededor del eje x	I <sub>x</sub> =	0.06	m <sup>2</sup>
Momento de inercia alrededor del eje y	I <sub>y</sub> =	0.35	m <sup>4</sup>
Momento Polar de inercia de la base adrede.	J <sub>z</sub> =	0.41	m <sup>4</sup>
Vertical z			

Fuente: Autor

Tabla 21 Parámetros de la máquina de Enfriamiento galopante

Parámetros de la máquina presentadas por el fabricante		
Peso del Compresor(W <sub>c</sub> )=	25	t
Peso del Motor Eléctrico(W <sub>me</sub> )=	10	t
Peso total de la máquina(W)=	35	t
Velocidad de operación(f <sub>o</sub> )=	1.5	RPM
Frecuencia ( $\omega$ )=2 $\pi$ (f <sub>o</sub> /60)=	0.16	rad/s

Fuente: Autor

$$a_0 = \frac{\omega B}{V_s}$$

$$a_0 = 0.00025$$

Cálculo de los coeficientes de rigidez dinámica:

Tabla 22 Resultados de los Parámetros Dinámicos en la Mesa de Enfriamiento.

CUADRO DEL RESUMEN DE RESULTADOS					
A=	1.33	m <sup>2</sup>			
L'=	1.77	m	I <sub>x</sub> =	0.06	m <sup>4</sup>
B'=	0.75	m	I <sub>y</sub> =	0.35	m <sup>4</sup>
q <sub>a</sub> =	4.96	t/m <sup>2</sup>	$\bar{K}_z$ =	40591.4	t/m
γ=	1.8	t/m <sup>3</sup>	$\bar{K}_y$ =	31700.53	t/m
g=	9.81	m/s <sup>2</sup>	$\bar{K}_x$ =	29259.52	t/m
X <sub>m</sub> =	0.89	m	$\bar{K}_{rx}$ =	5903.34	t. m/rad
Y <sub>m</sub> =	0.38	m	$\bar{K}_{ry}$ =	21250.49	t. m/rad
Z <sub>m</sub> =	0.28	m	$\bar{K}_t$ =	20152.24	t. m/rad

Fuente: Autor

Coeficiente elástico del suelo uniforme a compresión

$$C_u = \frac{K_z}{A} = 30577.36 \quad \text{t/m}^3$$

Coeficiente elástico del suelo uniforme a cortante

$$C_{ry} = \frac{Kh_y}{A} = 23879.87 \quad \text{t/m}^3$$

Coeficiente elástico del suelo uniforme a cortante

$$C_{rx} = \frac{Kh_x}{A} = 22041.07 \quad \text{t/m}^3$$

Coeficiente elástico del suelo no uniforme a compresión

$$C_{\phi x} = \frac{K_{\phi x}}{I_x} = 94868.43 \quad \text{t/m}^3 \text{ rad}$$

Coeficiente elástico del suelo no uniforme a compresión

### Coeficiente elástico del suelo no uniforme a cortante

Tabla 23 Centro de gravedad de Sección crítica de Mesa de Enfriamiento

DIMENCIONES				PESO DEL ELEMENTO	MASA DEL ELEMENTO	CG DE ELEMENTO					
elementos	X(m)	Y(m)	Z(m)	Ton	(Ton S2/m)	xi(m)	yi(m)	zi(m)	mi xi	mi yi	mi zi
A	1.1	0.75	1.64	3.24	0.33	0.89	0.38	0.82	0.29	0.12	0.27
B	0.34	0.75	1.20	0.72	0.07	0.17	0.38	0.60	0.01	0.03	0.04
C	0.34	0.75	1.20	0.72	0.07	1.60	0.38	0.60	0.12	0.03	0.04
pistón				35.00	3.57	0.89	0.38	0.22	3.16	1.34	0.78
				39.69	4.05				3.58	1.52	1.14

Fuente: Autor

$$\begin{aligned} X_m &= 0.89m \\ Y_m &= 0.38m \\ Z_m &= 0.28m \end{aligned}$$

$$ex = L - X_m = 0.00m$$

Momento de inercia de la masa alrededor del eje y:

$$M_{m0}^A = M_A \left[ \frac{a_{xa}^2 + a_{za}^2}{12} \right] + M_A \bar{Z}_{ib}^2 + M_A \bar{X}_{ib}^2$$

$$\begin{aligned} M_a &= 0.3285 \quad t.m.s^2 \\ M_b &= 0.0741 \quad t.m.s^2 \\ M_c &= 0.0741 \quad t.m.s^2 \end{aligned}$$

$$\sum M_{m0} = 0.4766 \quad t.m.s^2$$

$$M_{m0} = M_m + m (\bar{Z})^2$$

$$M_m = 0.16 \quad t.m.s^2$$

Figura 67 Momentos de Inercia de Masa en la Cimentación de la Mesa de Enfriamiento.

Fuente: Autor

Px	60	t			
Py	5	t			
Pz	35	t			
Mz	0	t. m			
My	0	t. m			
Mx	0	t. m			
Cu=	30577.36	t/m <sup>3</sup>	m=	4.05	t s <sup>2</sup> /m
Cøy=	94868.43	t/m <sup>3</sup>	ω=	0.16	rad/s
Cøx=	61315.34	t/m <sup>3</sup>	A=	1.33	m <sup>2</sup>



CTy=	23879.87	t/m <sup>3</sup>	Jz=	0.41	m <sup>4</sup>
CTx=	22041.07	t/m <sup>3</sup>			
CΨ=	49494.63	t/m <sup>3</sup>			

Figura 68 Parámetros Dinámicos de la Cimentación de la Mesa de Enfriamiento.

Fuente: Autor

### VIBRACIÓN SIMULTÁNEA, DESLIZAMIENTO HORIZONTAL Y CABECEO ALRADEADOR DEL EJE Z

$$\frac{M_m}{M_{mo}} = \gamma (\gamma < 1) = 0.33$$

$$\omega_{n1,2}^2 = \frac{1}{2\gamma} \left[ \omega_{n\phi}^2 + \omega_{nx}^2 \pm \sqrt{(\omega_{n\phi}^2 + \omega_{nx}^2)^2 - 4\gamma \omega_{n\phi}^2 \omega_{nx}^2} \right]$$

$$\omega_{n1}^2 = 151555.71$$

$$\omega_{n2}^2 = 6488.84$$

$$\omega_{n1} = 389.30 \quad \text{rad/s}$$

$$\omega_{n2} = 80.55 \quad \text{rad/s}$$

$$mM_m(\omega_{n1}^2 - \omega^2)(\omega_{n2}^2 - \omega^2) = \Delta(\omega^2)$$

$$\Delta(\omega^2) = 6.21\text{E}+08$$

$$A_{\phi s} = \frac{C_\tau AL}{\Delta(\omega^2)} P_x$$

### GIRO DE CIMENTACIÓN POR X

$$A_{\phi s} = 1.14\text{E}-02 \quad \text{rad} \quad Z_m = 0.28 \quad \text{m}$$

$$A_{xs} = \frac{C_\tau AL^2 + C_\phi I - WL - M_m \omega^2}{\Delta(\omega^2)} P_x$$

$$A_{xs} = 0.002 \quad \text{m}$$

$$A_{xs} = 2 \quad \text{mm}$$

para el momento My

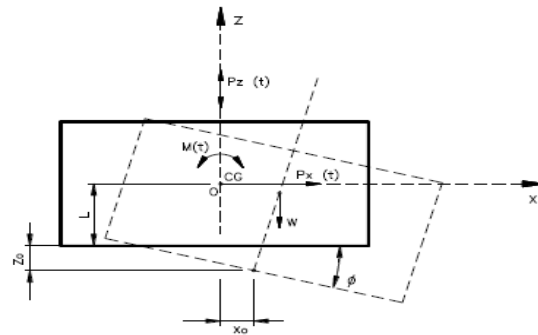
$$A_{xc} = \frac{C_\tau AL}{\Delta(\omega^2)} M_y$$

En vista de que la máquina no presenta momentos concentrados, no existirá amplitudes con relación al momento y.

Figura 69 Vibración Simultánea de la Mesa de Enfriamiento.

Fuente: Autor

Combinación final de amplitudes de vibración y desplazamientos dinámicos combinados



$$A_{xt} = \frac{(C_r AL^2 + C_\phi I - WL - M_m \omega^2) P_x + (C_r AL) M_y}{\Delta(\omega^2)}$$

$$A_{xt} = 2 \text{ mm}$$

$$A_{\phi t} = \frac{(C_r AL) P_x + (C_r A - m \omega^2) M_y}{\Delta(\omega^2)}$$

$$A_{\phi t} = 1.14\text{E-}02 \text{ rad}$$

Figura 70 Combinación Final de Amplitudes de la Mesa de Enfriamiento.

Fuente: Autor

Tabla 24 Resumen de resultados de frecuencias y amplitudes para la sección referencia de la Mesa de Enfriamiento

MODO	fm Frecuencia máquina $\omega$ (rad/s)	fo Frecuencia calculada $\omega_c$ (rad/s) (ver en anexos)	Revisión de resonancia fm/fo	Amplitud calculada mm (ver en anexos)	Amplitud permisible mm	Observaciones
Vertical Z	0.16	100.17	0.0016	0.86	2	cumple
Horizontal X	0.16	85.04	0.0018	2	2	cumple
Horizontal Y	0.16	88.52	0.0018	0.16	2	cumple
Giro alrededor Y	0.16	211.11	0.0007	-	-	-
Giro alrededor X	0.16	111.19	0.0014	-	-	-
Torsión	0.16	173.24	0.0009	-	-	-

Fuente: Autor

De la misma forma de la cimentación anterior podemos observar en la tabla 12, las frecuencias naturales calculadas del sistema con relación a la frecuencia de operación de la máquina son sumamente mayores, lo cual nos indica que las vibraciones que producirá el equipo cuando se encuentre en funcionamiento no producirá ninguna afectación en la cimentación diseñada. Además, las resonancias calculadas del sistema son inferiores al estado límite por resonancia de 0.8 de manera que no presenta una resonancia perjudicial para la cimentación. En cuanto a las amplitudes calculadas para los modos en dirección z y en dirección y son menores que la amplitud permisible estimada de 2 mm, sin embargo, la amplitud en dirección x se encuentra al límite, esto se puede haber producido debido a que la mesa de enfriamiento consta de un pistón en dirección x el cual produce las mayores vibraciones dentro del sistema máquina-cimentación; las amplitudes de giro producidas por las vibraciones de cabeceo y torsional en esta ocasión resultaron nulas por lo cual se optó por despreciarlas. Las amplitudes presentes en los resultados reflejan que las mayores amplitudes que se generarán son en la dirección x, ya que son un indicativo del funcionamiento de la maquinaria en forma horizontal para permitir el traslado de la palanquilla producido por el pistón mencionado.

## **6.2 ANÁLISIS DE DESPLAZAMIENTOS TOLERABLES Y CÁLCULO DEL MÓDULO DE BALASTO MEDIANTE PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS**

Para el siguiente apartado realizaremos un análisis de los desplazamientos tolerables que puede presentar el equipo en estudio a través de una simulación con un modelo representativo de las cimentaciones mediante el programa de elementos finitos, para que mediante sus resultados poder adquirir información relevante para el cálculo del módulo de balasto, el mismo que será necesario para posteriores cálculos dentro del diseño.

### **6.2.1 ANÁLISIS Y CÁLCULOS PARA SISTEMA DE CARGA EN CALIENTE**

Se comenzará con la geometría de la cimentación y datos del tipo de suelo que se presenta en el terreno de desplante (figura 71).

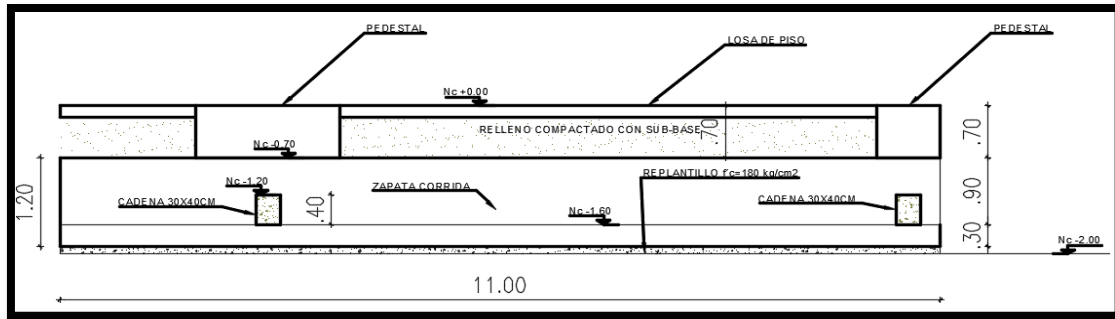


Figura 71 Geometría de cimentación del sistema de Carga en Caliente

Fuente: Autor

Modelado del terreno de la cimentación de carga en caliente para un ancho de cimentación de 2 m en el programa de elementos finitos (figura 72).

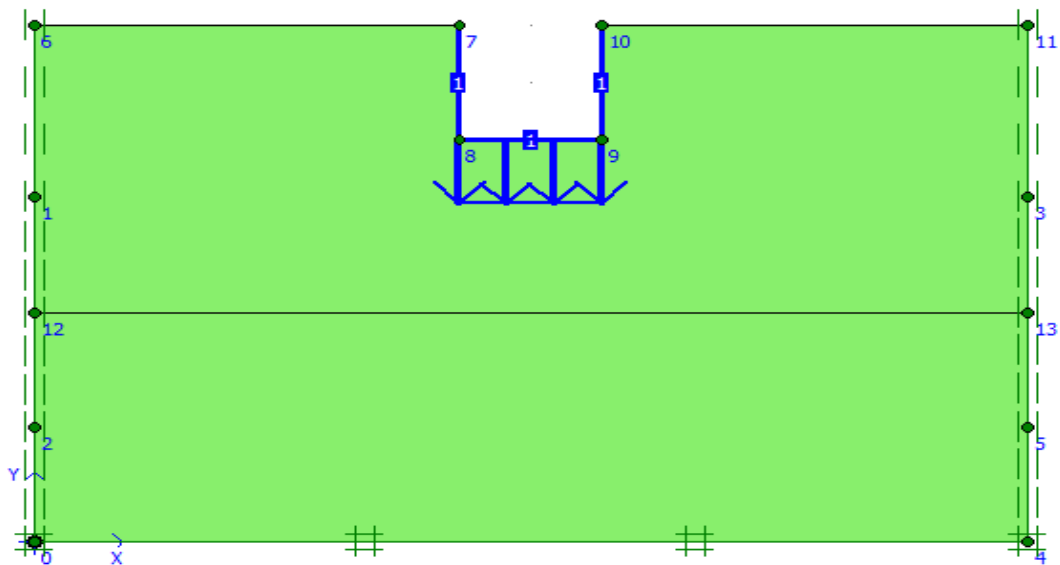
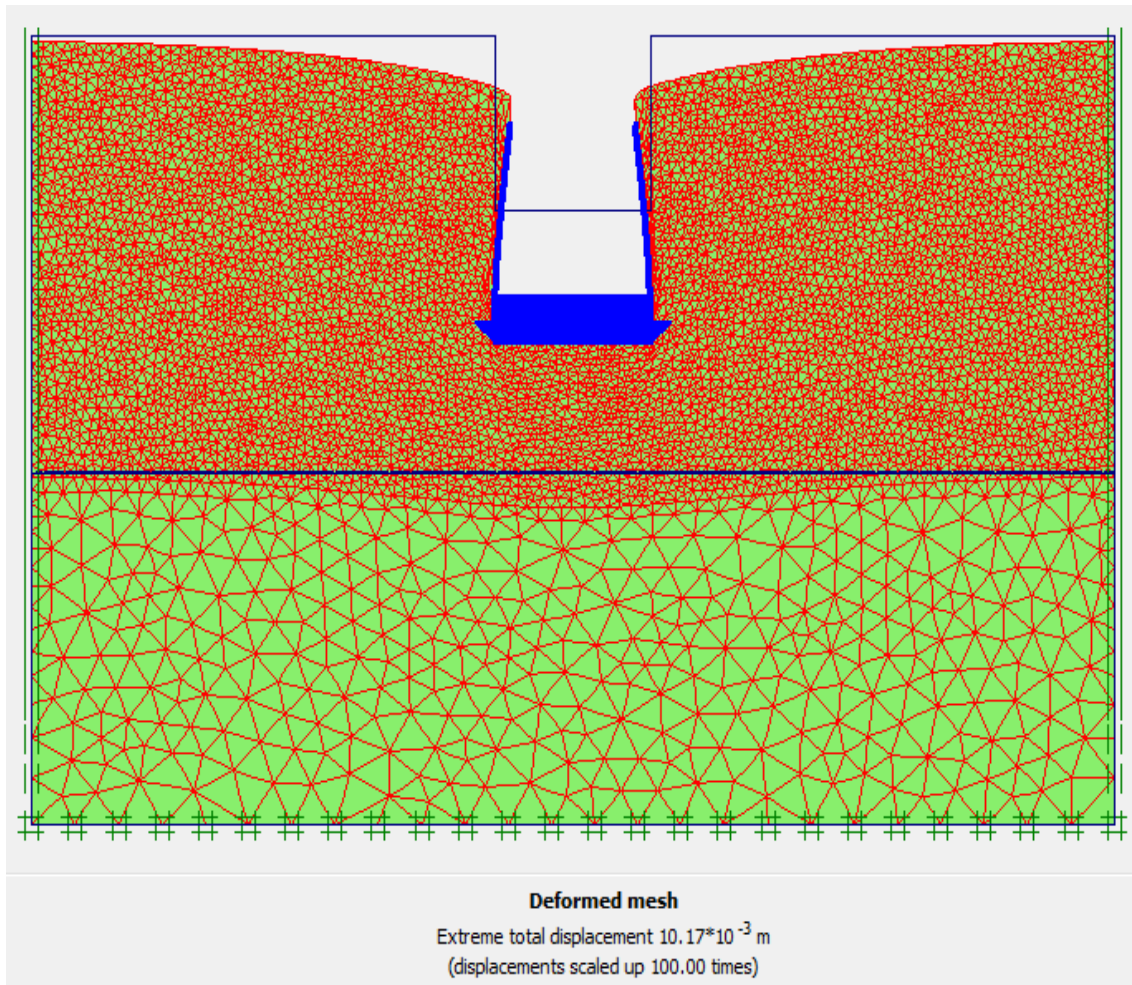


Figura 72 Modelado de terreno de desplante de cimentación de Carga en Caliente

Fuente: Autor

Una vez realizado el modelo con el ingreso de todos los parámetros del suelo de desplante presentados en cálculos anteriores se somete al modelo a un incremento progresivo de cargas con el fin de determinar el desplazamiento producido por las cargas de servicio, el cual nos presenta una gráfica característica entre la carga aplicada y el desplazamiento producido (figura 73).



*Figura 73 Resultado de desplazamiento de la cimentación modelada producida por cargas (Carga en C.)*

**Fuente: Autor**

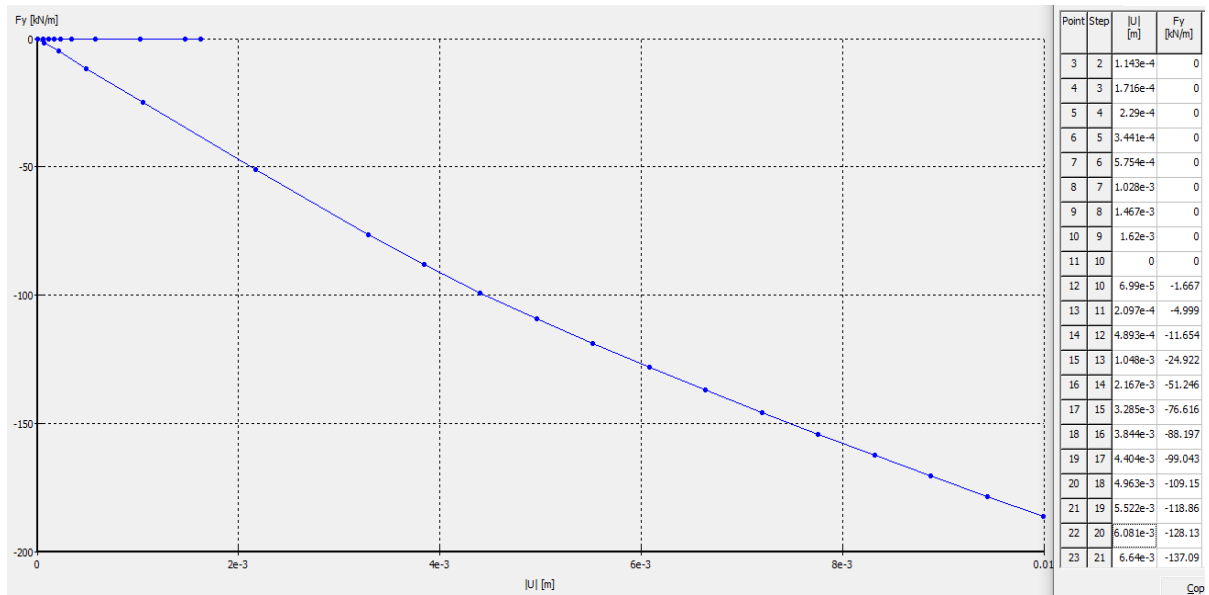


Figura 74 Gráfica Representativa (Carga Vs Desplazamiento)

Fuente: Autor

Como se puede observar en la gráfica anterior en base al modelo, podemos notar que, para un desplazamiento tolerable de 6 mm, se tendría que colocar una carga equivalente a 1409 KN, sin embargo, la cimentación del sistema de Carga en Caliente será sometida a una carga aproximada de 500 KN.

Para el cálculo del módulo de balasto se tomará esta información y se la obtendrá a través de las ecuaciones 91 y 92 fundamentales presentadas a continuación:

$$k = \frac{q}{s} \quad \text{Ec. 91}$$

$$q = \frac{F}{A} \quad \text{Ec.92}$$

Dónde:

k= Coeficiente de balasto

q= Presión transmitida

s= asentamiento producido en el suelo

F= Fuerza aplicada

A= Área de aplicación

$$q = \frac{1409.43}{(2 * 11)} = 64.065 \frac{KN}{m^2}$$

$$k = \frac{64.065}{0.006} = 10677.5 \frac{KN}{m^3}$$

$$k = 1.09 \frac{kg}{cm^3}$$

## 6.2.2 ANÁLISIS Y CÁLCULOS PARA LA MESA DE ENFRIAMIENTO

### GALOPANTE

Se comenzará con la geometría de la cimentación (figura 75) y datos del tipo de suelo que se presenta en el terreno de desplante.

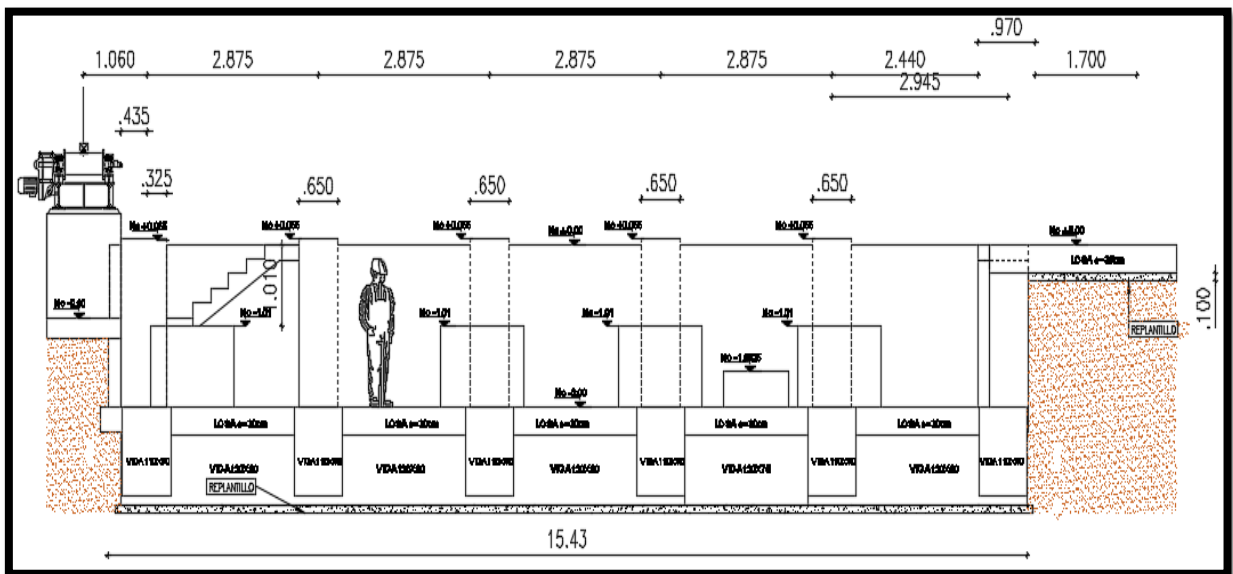
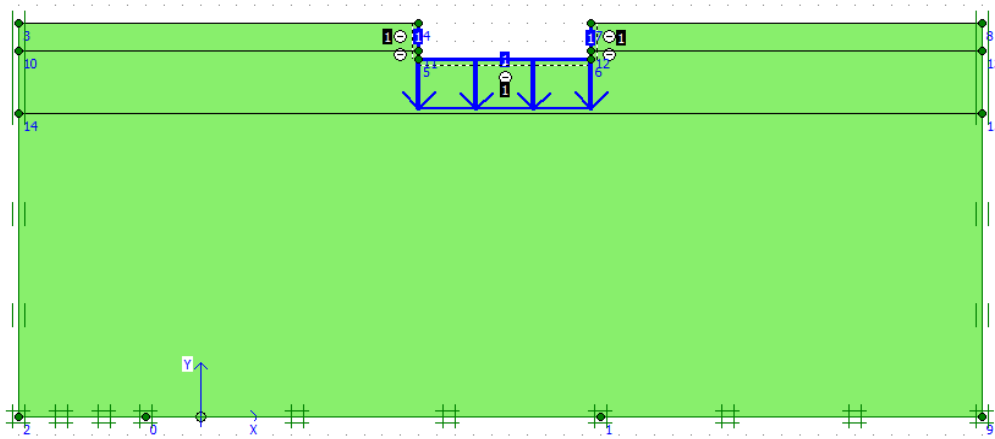


Figura 75 Geometría de cimentación de la mesa de enfriamiento

Fuente: Autor

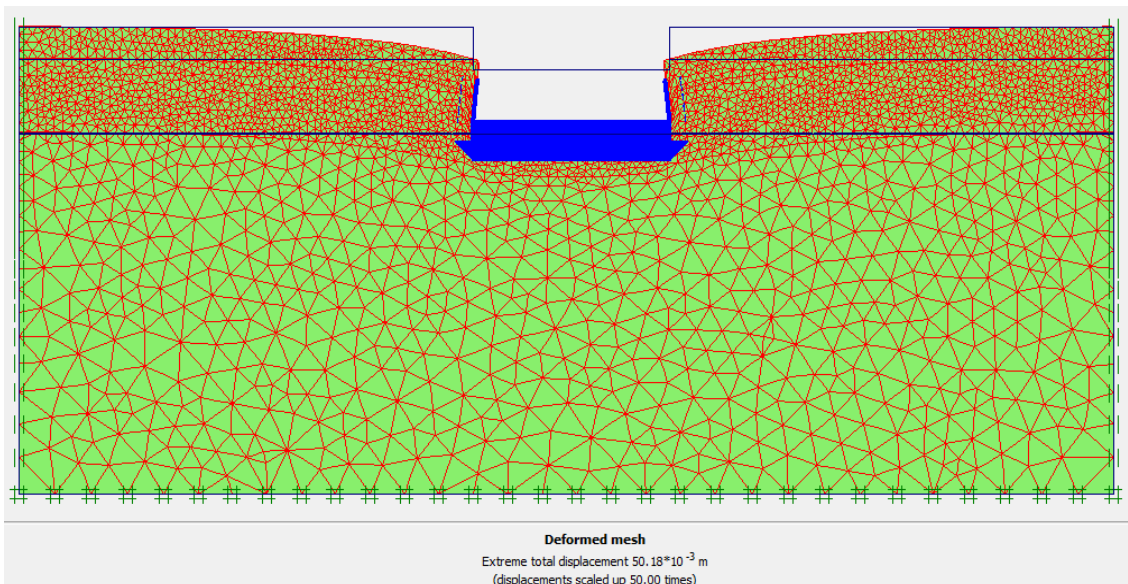
Modelado del terreno de la cimentación de la mesa de enfriamiento galopante con un ancho de 9.65 m en el programa de elementos finitos presente en la figura 76.



*Figura 76 Modelado de terreno de desplante de cimentación de la Mesa de Carga*

**Fuente: Autor**

Una vez realizado el modelo con el ingreso de todos los parámetros del suelo de desplante presentados en cálculos anteriores se somete al modelo a un incremento progresivo de cargas con el fin de determinar el desplazamiento producido por las cargas de servicio (figura 77), el cual nos presenta una gráfica característica entre la carga aplicada y el desplazamiento producido en la figura 78.



*Figura 77 Resultado de desplazamiento de la cimentación modelada producida por cargas (Mesa de Enfri.)*

**Fuente: Autor**



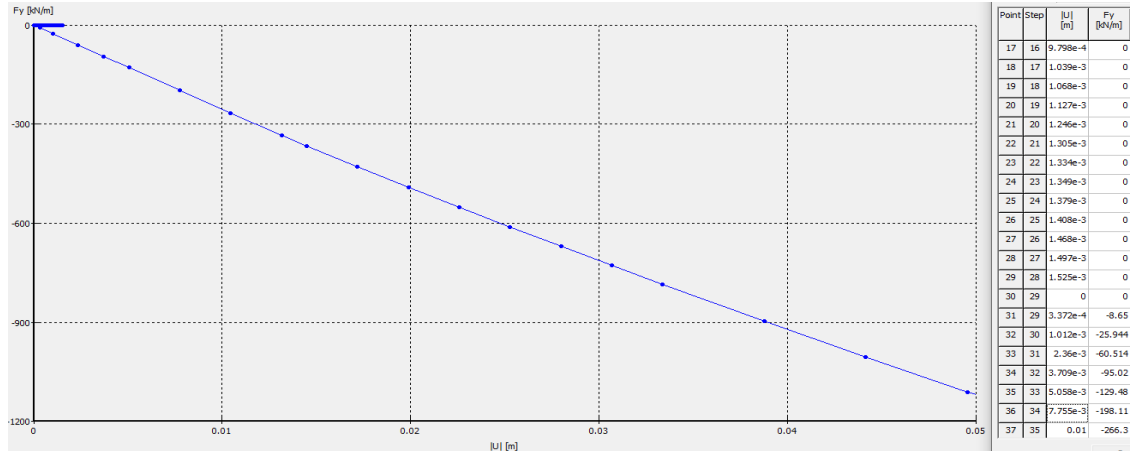


Figura 78 Gráfica Representativa (Carga Vs Desplazamiento)

Fuente: Autor

Como se puede observar en la gráfica anterior en base al modelo, podemos notar que para un desplazamiento tolerable de 6 mm, se tendría que colocar una carga equivalente a 2367.73 KN, sin embargo, la cimentación del sistema de la Mesa de Enfriamiento Galopante será sometida a varias cargas, dentro de las cuales la más crítica es una carga aproximada de 450 KN.

Para el cálculo del módulo de balasto se tomará esta información y se la obtendrá a través de las ecuaciones fundamentales presentadas a continuación:

$$k = \frac{q}{s} \quad \text{Ec. 91}$$

$$q = \frac{F}{A} \quad \text{Ec. 92}$$

Dónde:

k= Coeficiente de balasto

q= Presión transmitida

s= asentamiento producido en el suelo

F= Fuerza aplicada

A= Área de aplicación

$$q = \frac{2367.73}{(9.65 * 15.43)} = 15.90 \frac{KN}{m^2}$$

$$k = \frac{15.90}{0.006} = 2650.25 \frac{KN}{m^3}$$

$$k = 0.27 \frac{kg}{cm^3}$$

### **6.3 VERIFICACIÓN DE FRECUENCIAS Y COEFICIENTES DE RIGIDEZ DINAMICA MEDIANTE SOFTWARE COMERCIAL**

Mediante la implementación del software comercial procederemos a realizar la verificación de las rigideces dinámicas de las cimentaciones de estudio para realizar una comparación aproximada entre el programa mencionado y los cálculos realizados con Excel en capítulos anteriores, puesto que, las dos resoluciones aplican la metodología de Dobry y Gazetas con muy pequeñas variaciones que serán observables en sus resultados.

#### **6.3.1 VERIFICACIÓN EN CIMENTACIÓN DE SISTEMA DE CARGA EN CALIENTE**

Para poder trabajar con el software comercial tendremos que comenzar con la introducción de los parámetros de la cimentación como son su geometría, su centro de gravedad (figura 79), así como también su masa y cargas actuantes en la cimentación; también será indispensable la colocación de los parámetros dinámicos del suelo sobre el cual se va a situar el proyecto (figura 80).

**Mass Data**

Mass moment of inertia should include all equipment masses and mass of the concrete footing or cap.

If you already figured out the mass moment of inertia for the foundation system, please enter the data into the right data boxes.

If you need the program to help you make computations, please enter the local coordinates of the C.B. and click the Button "Input all the mass components" below.

After all the data entered, you may click the next Button "Calculate mass moment of inertia". The data editing boxes at the right side will be filled out with the computed data.

Local coordinates of C.B.

x-coord. of C.B. (m)

y-coord. of C.B. (m)

z-coord. of C.B. (m)

Combined Mass (including self-weight) on Foundation

Total mass (self weight only) of the foundation (Mg)	9.01
Mass moment of inertia about X-axis ( $Mg \cdot m^2$ )	3.61166422012578
Mass moment of inertia about Y-axis ( $Mg \cdot m^2$ )	122.373196148723
Mass moment of inertia about Z-axis ( $Mg \cdot m^2$ )	120.082998595264
Cross product X-Y (product of inertia) ( $Mg \cdot m^2$ )	0
Cross product X-Z (product of inertia) ( $Mg \cdot m^2$ )	0.58152403773584
Cross product Y-Z (product of inertia) ( $Mg \cdot m^2$ )	0

Computed Coordinates of C.G. in local coordinates

x-coord. of C.G. (m)	5.34742508324084
y-coord. of C.G. (m)	1
z-coord. of C.G. (m)	1.12698113207547

Computed Coordinates of C.B. in global coordinates

X-coord. of C.B. (m)	0.00257491675915
Y-coord. of C.B. (m)	0
Z-coord. of C.B. (m)	1.12698113207547

**Mass Components including equipment, and self weight of footing**

Mass #	Mass (Mg)	x-Coord. (m)	y-Coord. (m)	z-Coord. (m)	Length (x-direction) (m)	Width (y-direction) (m)	Thickness (z-direction) (m)
1	1.615	5.5	1	0.15	11	2	0.3
2	1.938	5.5	1	0.75	11	0.8	0.9
3	0.11	0.4	1	1.55	0.8	0.8	0.7
4	0.247	8.4	1	1.55	1.8	0.8	0.7
5	2.04	0.4	1	1.55	0	0	0
6	3.06	8.4	1	1.55	0	0	0

Figura 79 Introducción de datos requeridos en Cimentación de Carga en Caliente

Fuente: Autor

**Soil Below The Footing**

Shear wave velocity (m/sec)

Unit weight (kN/m<sup>3</sup>)

Poisson's ratio

Material damping

**Soil Layer Data**

	Thickness	Shear Wave	Unit Weight	Poisson's	Material	Weak Zone Shear
	(m)	Velocity, (m/SEC)	(kN/m <sup>3</sup> )	Ratio	Damping	Modulus Ratio
1	0	236.3	18	0.3	0.05	1

**Harmonic Loading Data, NonQuadratic**

Maximum Frequency (Hz)

Minimum Frequency (Hz)

Step frequency (incremental frequency) (Hz)

Force in X-direction (kN)

Force in Y-direction (kN)

Force in Z-direction (kN)

Moment about X-axis (kN-m)

Moment about Y-axis (kN-m)

Moment about Z-axis (kN-m)

Point of Application of Load

☐ Referred to the Center of Gravity (Global Coordinates)

☒ Referred to the Center of Base (local coordinates)

x-coordinate (m)

y-coordinate (m)

z-coordinate (m)

Figura 80 Parámetros del suelo y Cargas Aplicadas del Sistema de Carga en Caliente

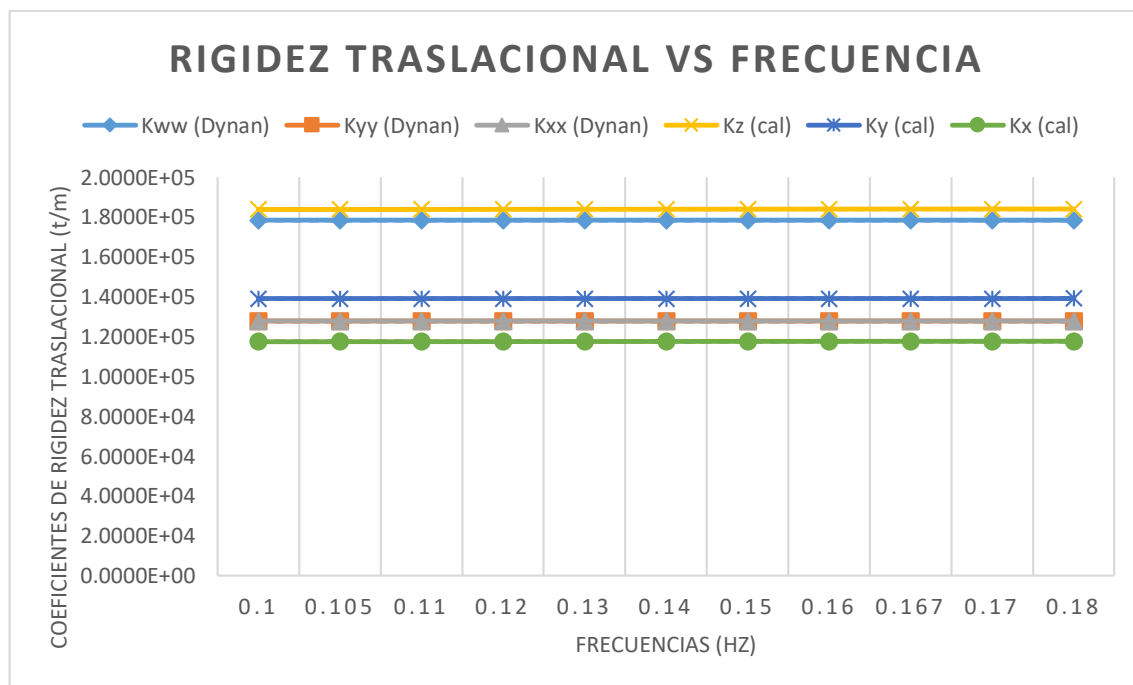
Fuente: Autor

Una vez terminado la colocación de toda la información requerida, obtendremos los resultados esperados a través de la gráfica 1 explicativa de comparación entre los coeficientes de rigidez dinámico obtenidos en el programa comercial y los generados en el programa Excel y será presentada a continuación con un resumen de la tabla 25:

*Tabla 25 Resultados de Coeficientes de Rigidez Dinámica Traslacional en Sistema de carga en caliente*

Frecuencia en (Hz)	Calculados por el programa			Calculados bajo metodología en EXCEL			Kww Vs Kz	Kyy Vs Ky	Kxx Vs Kx
	Kww (Dyan)	Kyy (Dyan)	Kxx (Dyan)	Kz (cal)	Ky (cal)	Kx (cal)	% de Error entre Programas	% de Error entre Programas	% de Error entre Programas
	(t/m)	(t/m)	(t/m)	(t/m)	(t/m)	(t/m)			
0.1	1.8E+05	1.3E+05	1.3E+05	1.8E+05	1.4E+05	1.2E+05	3%	9%	8%
0.105	1.8E+05	1.3E+05	1.3E+05	1.8E+05	1.4E+05	1.2E+05	3%	9%	8%
0.11	1.8E+05	1.3E+05	1.3E+05	1.8E+05	1.4E+05	1.2E+05	3%	9%	8%
0.12	1.8E+05	1.3E+05	1.3E+05	1.8E+05	1.4E+05	1.2E+05	3%	9%	8%
0.13	1.8E+05	1.3E+05	1.3E+05	1.8E+05	1.4E+05	1.2E+05	3%	9%	8%
0.14	1.8E+05	1.3E+05	1.3E+05	1.8E+05	1.4E+05	1.2E+05	3%	9%	8%
0.15	1.8E+05	1.3E+05	1.3E+05	1.8E+05	1.4E+05	1.2E+05	3%	9%	8%
0.16	1.8E+05	1.3E+05	1.3E+05	1.8E+05	1.4E+05	1.2E+05	3%	9%	8%
0.167	1.8E+05	1.3E+05	1.3E+05	1.8E+05	1.4E+05	1.2E+05	3%	9%	8%
0.17	1.8E+05	1.3E+05	1.3E+05	1.8E+05	1.4E+05	1.2E+05	3%	9%	8%
0.18	1.8E+05	1.3E+05	1.3E+05	1.8E+05	1.4E+05	1.2E+05	3%	9%	8%

Fuente: Autor



*Gráfico 1 Relación de Rigidez Traslacional y Frecuencia del sistema de Carga en Caliente*

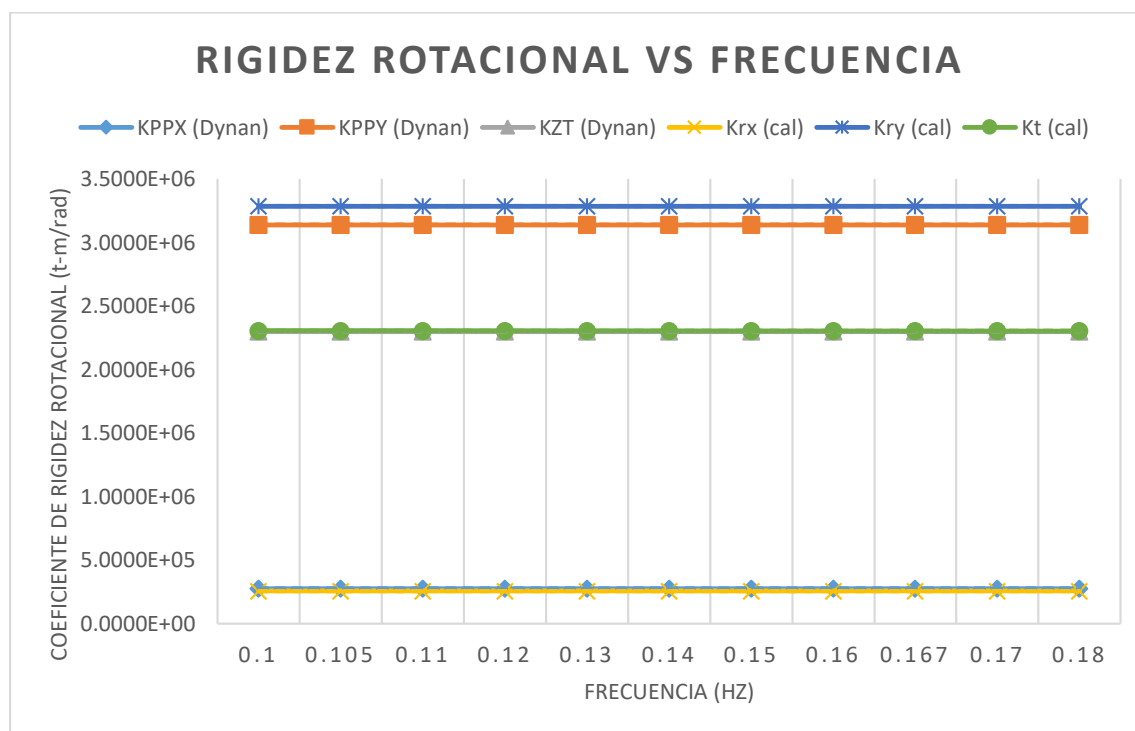
Fuente: Autor

En base al porcentaje de error obtenido entre los cálculos de las rigideces por los dos programas observados en la tabla 26, se observa que los porcentajes son mínimos por lo cual se puede decir que los valores obtenidos son correctos.

*Tabla 26 Resultados de Coeficientes de Rigidez Dinámica Rotacional en Sistema de carga en caliente*

Frecuencia en (Hz)	Calculados por el programa			Calculados bajo metodología en EXCEL			KPPX Vs Krx	KPPY Vs Kry	KZT Vs Kt
	KPPX (Dyan) (t-m/red)	KPPY (Dyan) (t-m/rad)	KZT (Dyan) (t-m/rad)	Krx (cal) (t-m/rad)	Kry (cal) (t-m/rad)	Kt (cal) (t-m/rad)	% de Error entre Programas	% de Error entre Programas	% de Error entre Programas
0.1	2.8E+05	3.1E+06	2.3E+06	2.6E+05	3.3E+06	2.3E+06	7%	5%	0%
0.105	2.8E+05	3.1E+06	2.3E+06	2.6E+05	3.3E+06	2.3E+06	7%	5%	0%
0.11	2.8E+05	3.1E+06	2.3E+06	2.6E+05	3.3E+06	2.3E+06	7%	5%	0%
0.12	2.8E+05	3.1E+06	2.3E+06	2.6E+05	3.3E+06	2.3E+06	7%	5%	0%
0.13	2.8E+05	3.1E+06	2.3E+06	2.6E+05	3.3E+06	2.3E+06	7%	5%	0%
0.14	2.8E+05	3.1E+06	2.3E+06	2.6E+05	3.3E+06	2.3E+06	7%	5%	0%
0.15	2.8E+05	3.1E+06	2.3E+06	2.6E+05	3.3E+06	2.3E+06	7%	5%	0%
0.16	2.8E+05	3.1E+06	2.3E+06	2.6E+05	3.3E+06	2.3E+06	7%	5%	0%
0.167	2.8E+05	3.1E+06	2.3E+06	2.6E+05	3.3E+06	2.3E+06	7%	5%	0%
0.17	2.8E+05	3.1E+06	2.3E+06	2.6E+05	3.3E+06	2.3E+06	7%	5%	0%
0.18	2.8E+05	3.1E+06	2.3E+06	2.6E+05	3.3E+06	2.3E+06	7%	5%	0%

Fuente: Autor



*Gráfico 2 Relación de Coeficientes Dinámicos Rotacionales Para Carga en Caliente*

Fuente: Autor

Como se puede observar en la gráfica 2 la relación entre las rigideces tanto del software comercial y el de Excel presentan una estrecha similitud lo cual nos confirma la validez del uso de las ecuaciones propuestas por Dobry y Gazetas en caso de hacer su cálculo de forma manual.

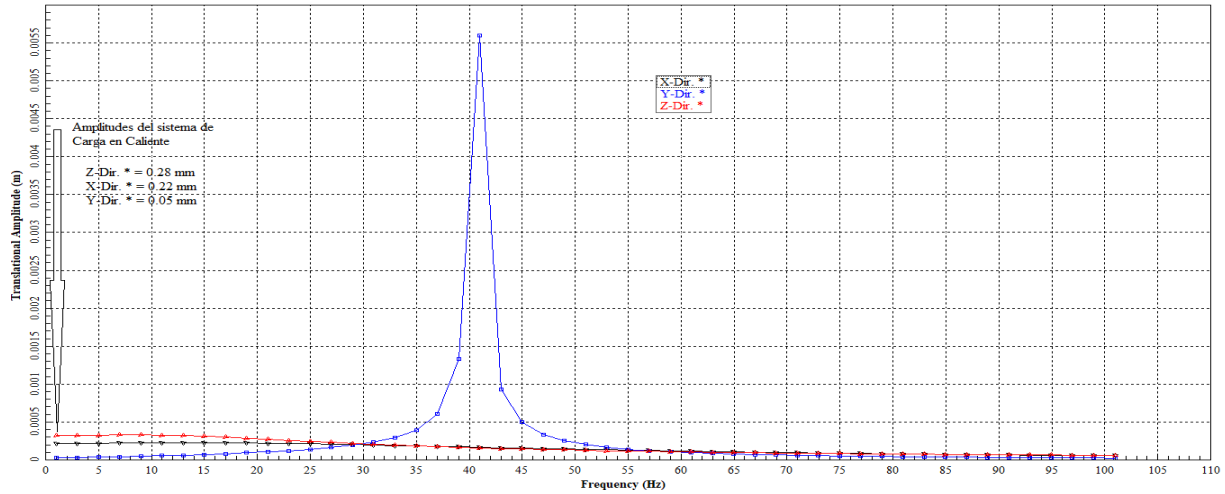


Figura 81 Amplitudes Traslacionales para diferentes frecuencias realizadas en programa comercial

Fuente: Autor

Como se puede visualizar en la figura 81 de las relaciones de frecuencia y amplitudes vemos que las relaciones de resonancia generadas por el sistema de Carga en Caliente son muy pequeñas para que puedan producir daños a la estructura con lo cual nos garantiza en buen desempeño que presenta la cimentación. Además, existe una relación muy cercana entre los valores de las amplitudes determinadas por el software comercial y las calculadas mediante Excel.

Las amplitudes del sistema de Carga en Caliente determinadas por el programa son las siguiente presentadas por la tabla 27:

Tabla 27 Resumen Comparativo de Amplitudes Determinadas para la Cimentación de Carga en Caliente.

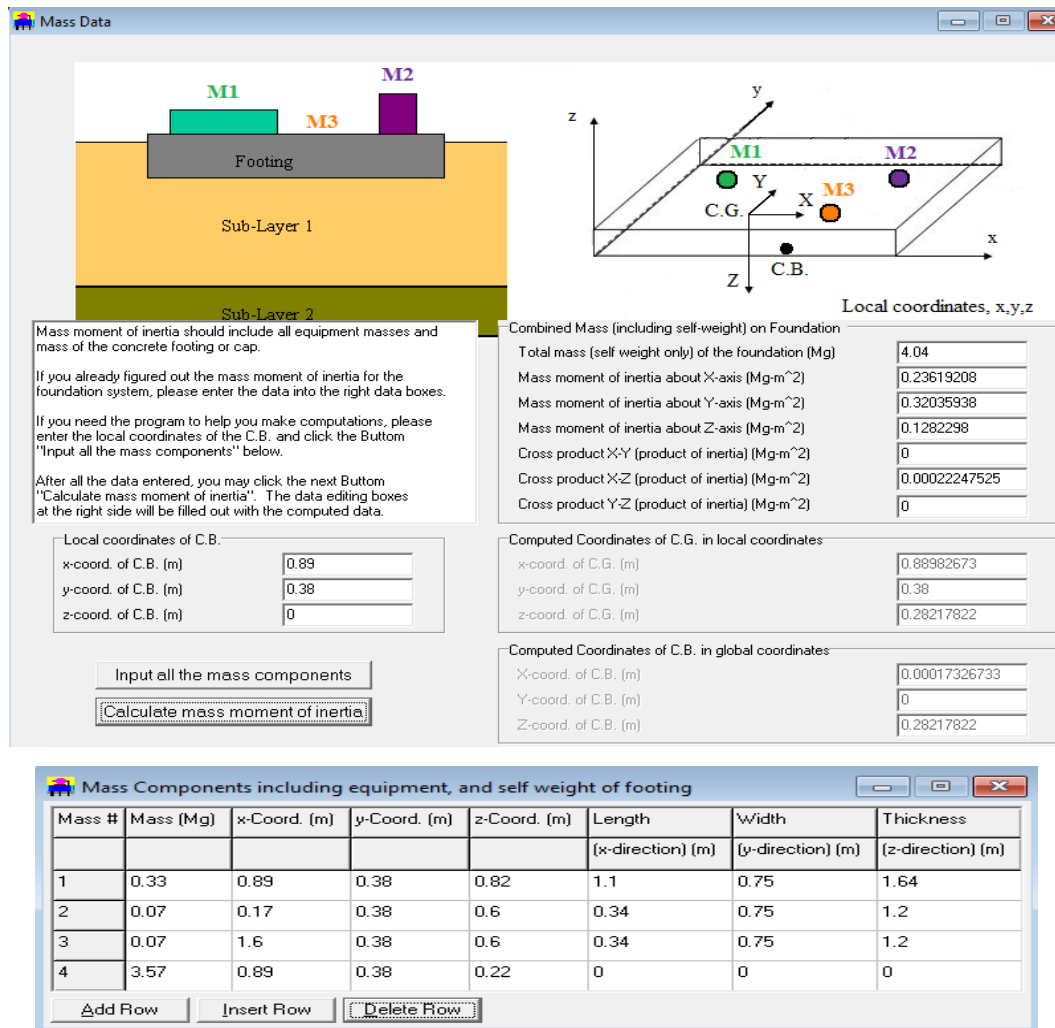
MODO	fm Frecuencia máquina $\omega$ (rad/s)	Revisión de resonancia fm/fo	Amplitud calculada mm	Amplitud de software mm	% de error entre amplitudes (Excel vs software)
Vertical Z	1.05	0.0073	0.27	0.28	3.0%
Horizontal X	1.05	0.0092	0.22	0.22	1.0%
Horizontal Y	1.05	0.0084	0.07	0.07	2.6%
Giro alrededor Y	1.05	0.0067	-	-	-
Giro alrededor X	1.05	0.0239	-	-	-
Torsión	1.05	0.0045	-	-	-

Fuente: Autor

## 6.3.2 VERIFICACIÓN EN CIMENTACIÓN DE MESA DE ENFRIAMIENTO

### GALOPANTE

Para poder trabajar con el software comercial tendremos que comenzar con la incorporación de los parámetros de la cimentación como son su geometría, su centro de gravedad presentes en la figura 82, así como también su masa y cargas actuantes en la cimentación; también será indispensable la colocación de los parámetros dinámicos del suelo sobre el cual se va a situar el proyecto.



The software interface is titled 'Mass Data'. It features a 3D model of a foundation system with three masses (M1, M2, M3) on a 'Footing' which sits on 'Sub-Layer 1' and 'Sub-Layer 2'. A coordinate system (x, y, z) is shown with the center of gravity (C.G.) and center of buoyancy (C.B.) marked.

Below the model, there are instructions and input fields:

Mass moment of inertia should include all equipment masses and mass of the concrete footing or cap.  
 If you already figured out the mass moment of inertia for the foundation system, please enter the data into the right data boxes.  
 If you need the program to help you make computations, please enter the local coordinates of the C.B. and click the Button "Input all the mass components" below.  
 After all the data entered, you may click the next Button "Calculate mass moment of inertia". The data editing boxes at the right side will be filled out with the computed data.

Local coordinates of C.B.  
 x-coord. of C.B. (m)   
 y-coord. of C.B. (m)   
 z-coord. of C.B. (m)

Buttons:

Computed data (including self-weight) on Foundation:

Total mass (self weight only) of the foundation (Mg)	4.04
Mass moment of inertia about X-axis (Mg-m <sup>2</sup> )	0.23619208
Mass moment of inertia about Y-axis (Mg-m <sup>2</sup> )	0.32035938
Mass moment of inertia about Z-axis (Mg-m <sup>2</sup> )	0.1282298
Cross product X-Y (product of inertia) (Mg-m <sup>2</sup> )	0
Cross product X-Z (product of inertia) (Mg-m <sup>2</sup> )	0.0002247525
Cross product Y-Z (product of inertia) (Mg-m <sup>2</sup> )	0

Computed Coordinates of C.G. in local coordinates:

x-coord. of C.G. (m)	0.88982673
y-coord. of C.G. (m)	0.38
z-coord. of C.G. (m)	0.28217822

Computed Coordinates of C.B. in global coordinates:

X-coord. of C.B. (m)	0.00017326733
Y-coord. of C.B. (m)	0
Z-coord. of C.B. (m)	0.28217822

Below this, there is a table titled 'Mass Components including equipment, and self weight of footing':

Mass #	Mass (Mg)	x-Coord. (m)	y-Coord. (m)	z-Coord. (m)	Length (x-direction) (m)	Width (y-direction) (m)	Thickness (z-direction) (m)
1	0.33	0.89	0.38	0.82	1.1	0.75	1.64
2	0.07	0.17	0.38	0.6	0.34	0.75	1.2
3	0.07	1.6	0.38	0.6	0.34	0.75	1.2
4	3.57	0.89	0.38	0.22	0	0	0

Buttons:

Figura 82 Introducción de datos requeridos en Cimentación de la Mesa de enfriamiento

Fuente: Autor



**Soil Below The Footing**

Shear wave velocity (m/sec)

Unit weight (kN/m<sup>3</sup>)

Poisson's ratio

Material damping

**Soil Layer Data**

	Thickness	Shear Wave	Unit Weight	Poisson's	Material	Weak Zone Shear
	(m)	Velocity, (m/SEC)	(kN/m <sup>3</sup> )	Ratio	Damping	Modulus Ratio
1	0	236.3	18	0.3	0.05	1

**Harmonic Loading Data, NonQuadratic**

Maximum Frequency (Hz)

Minimum Frequency (Hz)

Step frequency (incremental frequency) (Hz)

Force in X-direction (kN)

Force in Y-direction (kN)

Force in Z-direction (kN)

Moment about X-axis (kN-m)

Moment about Y-axis (kN-m)

Moment about Z-axis (kN-m)

Point of Application of Load

☒ Referred to the Center of Gravity (Global Coordinates)  
☐ Referred to the Center of Base (local coordinates)

X-coordinate (m)

Y-coordinate (m)

Z-coordinate (m)

Figura 83 Parámetros del suelo y Cargas Aplicadas del Sistema de la Mesa de Enfriamiento

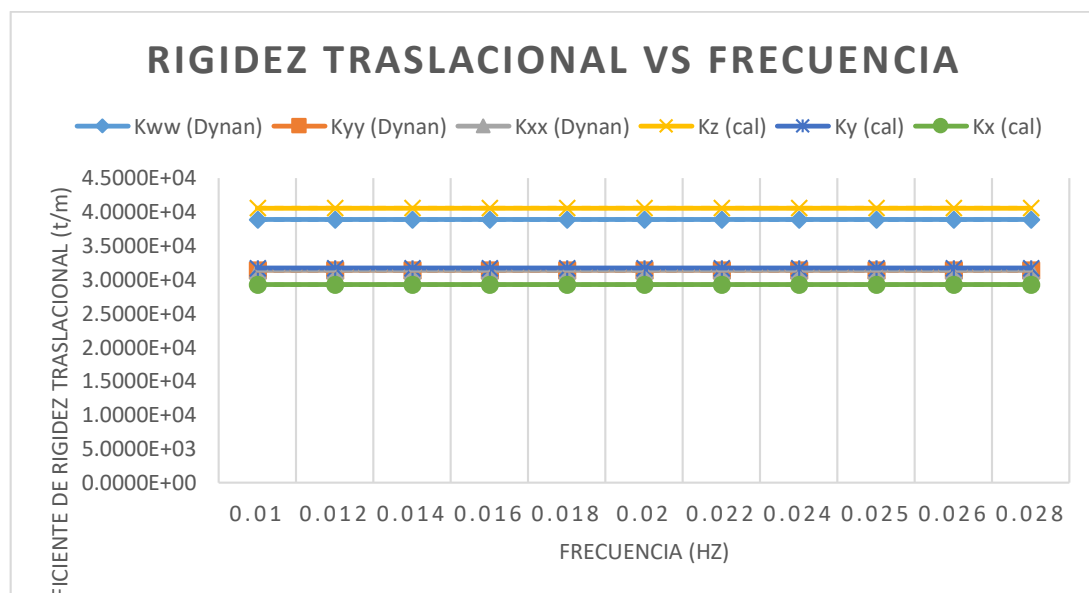
Fuente: Autor

Una vez terminado la colocación de toda la información requerida, obtendremos los resultados esperados a través de una gráfica explicativa de comparación entre los coeficientes de rigidez dinámico obtenidos en el programa comercial y los generados en el programa Excel y será presentada a continuación en la tabla 28:

*Tabla 28 Resultados de Coeficientes de Rigidez Dinámica Traslacional en Mesa de Enfriamiento*

Frecuencia en (Hz)	Calculados por el programa			Calculados bajo metodología en EXCEL			Kww Vs Kz	Kyy Vs Ky	Kxx Vs Kx
	Kww (Dyan)	Kyy (Dyan)	Kxx (Dyan)	Kz (cal)	Ky (cal)	Kx (cal)	% de Error entre Programas	% de Error entre Programas	% de Error entre Programas
	(t/m)	(t/m)	(t/m)	(t/m)	(t/m)	(t/m)			
0.01	3.9E+04	3.1E+04	3.1E+04	4.1E+04	3.2E+04	2.9E+04	4%	1%	7%
0.012	3.9E+04	3.1E+04	3.1E+04	4.1E+04	3.2E+04	2.9E+04	4%	1%	7%
0.014	3.9E+04	3.1E+04	3.1E+04	4.1E+04	3.2E+04	2.9E+04	4%	1%	7%
0.016	3.9E+04	3.1E+04	3.1E+04	4.1E+04	3.2E+04	2.9E+04	4%	1%	7%
0.018	3.9E+04	3.1E+04	3.1E+04	4.1E+04	3.2E+04	2.9E+04	4%	1%	7%
0.02	3.9E+04	3.1E+04	3.1E+04	4.1E+04	3.2E+04	2.9E+04	4%	1%	7%
0.022	3.9E+04	3.1E+04	3.1E+04	4.1E+04	3.2E+04	2.9E+04	4%	1%	7%
0.024	3.9E+04	3.1E+04	3.1E+04	4.1E+04	3.2E+04	2.9E+04	4%	1%	7%
0.025	3.9E+04	3.1E+04	3.1E+04	4.1E+04	3.2E+04	2.9E+04	4%	1%	7%
0.026	3.9E+04	3.1E+04	3.1E+04	4.1E+04	3.2E+04	2.9E+04	4%	1%	7%
0.028	3.9E+04	3.1E+04	3.1E+04	4.1E+04	3.2E+04	2.9E+04	4%	1%	7%

**Fuente: Autor**



*Gráfico 3 Relación de Rigidez Traslacional y Frecuencia de la Mesa de Enfriamiento*

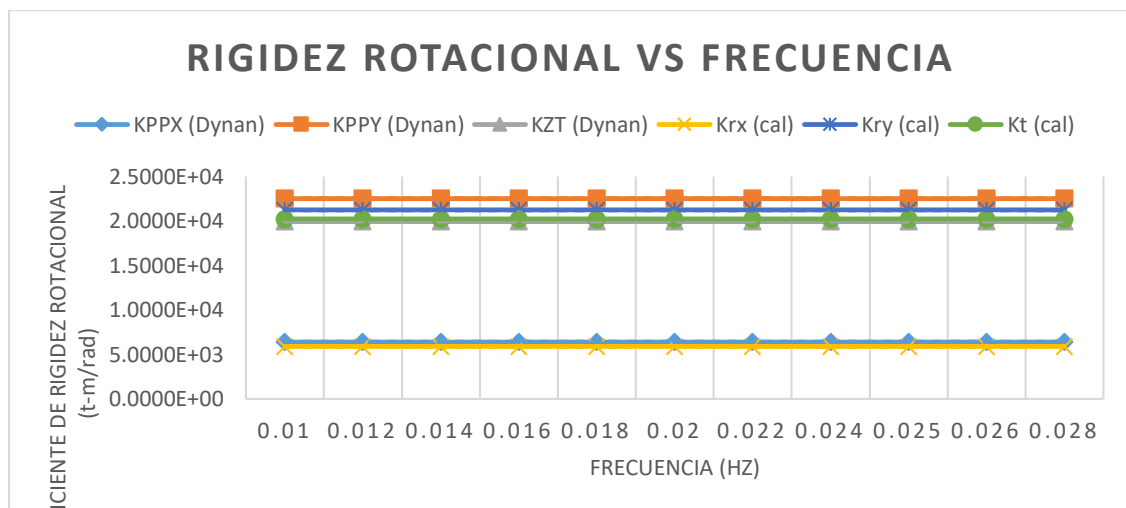
**Fuente: Autor**

En base al porcentaje de error obtenido entre los cálculos de las rigideces por los dos programas presentes en la tabla 29, se observa que los porcentajes son mínimos por lo cual se puede decir que los valores obtenidos son correctos.

*Tabla 29 Resultados de Coeficientes de Rigidez Dinámica Rotacional en la Mesa de Enfriamiento*

Frecuencia en (Hz)	Calculados por el programa			Calculados bajo metodología en EXCEL			KPPX Vs Krx	KPPY Vs Kry	KZT Vs Kt
	KPPX (Dyan)	KPPY (Dyan)	KZT (Dyan)	Krx (cal)	Kry (cal)	Kt (cal)	% de Error entre Programas	% de Error entre Programas	% de Error entre Programas
0.01	6.4E+03	2.3E+04	2.0E+04	5.9E+03	2.1E+04	2.0E+04	8%	6%	1%
0.012	6.4E+03	2.3E+04	2.0E+04	5.9E+03	2.1E+04	2.0E+04	8%	6%	1%
0.014	6.4E+03	2.3E+04	2.0E+04	5.9E+03	2.1E+04	2.0E+04	8%	6%	1%
0.016	6.4E+03	2.3E+04	2.0E+04	5.9E+03	2.1E+04	2.0E+04	8%	6%	1%
0.018	6.4E+03	2.3E+04	2.0E+04	5.9E+03	2.1E+04	2.0E+04	8%	6%	1%
0.02	6.4E+03	2.3E+04	2.0E+04	5.9E+03	2.1E+04	2.0E+04	8%	6%	1%
0.022	6.4E+03	2.3E+04	2.0E+04	5.9E+03	2.1E+04	2.0E+04	8%	6%	1%
0.024	6.4E+03	2.3E+04	2.0E+04	5.9E+03	2.1E+04	2.0E+04	8%	6%	1%
0.025	6.4E+03	2.3E+04	2.0E+04	5.9E+03	2.1E+04	2.0E+04	8%	6%	1%
0.026	6.4E+03	2.3E+04	2.0E+04	5.9E+03	2.1E+04	2.0E+04	8%	6%	1%
0.028	6.4E+03	2.3E+04	2.0E+04	5.9E+03	2.1E+04	2.0E+04	8%	6%	1%

**Fuente: Autor**



*Gráfico 4 Relación de Coeficientes Dinámicos Rotacionales Para Mesa de Enfriamiento*

**Fuente: Autor**

Como se puede observar en la gráfica 4 la relación entre las rigideces tanto del software comercial y el de Excel presentan una estrecha similitud lo cual nos confirma la validez del uso de las ecuaciones propuestas por Dobry y Gazetas en caso de hacer su cálculo de forma manual.

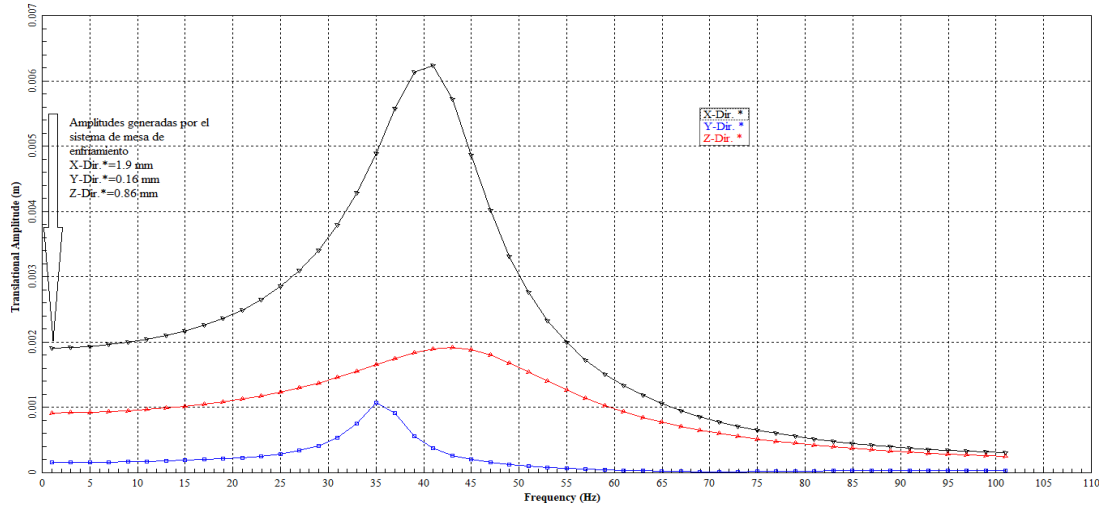


Figura 84 Amplitudes Traslacionales para diferentes frecuencias realizadas en programa comercial

Fuente: Autor

Como se puede visualizar en la figura 84 de las relaciones de frecuencia y amplitudes vemos que las relaciones de resonancia generadas por el sistema de la mesa de enfriamiento son muy pequeñas para que puedan producir daños a la estructura con lo cual nos garantiza en buen desempeño que presenta la cimentación. Además, existe una relación muy cercana entre los valores de las amplitudes determinadas por el software y las calculadas mediante Excel.

Las amplitudes del sistema de la mesa de enfriamiento determinadas por el programa son las siguiente expuestas en la tabla 30:

Tabla 30 Resumen Comparativo de Amplitudes Determinadas para la Cimentación de la Mesa de Enfriamiento

MODO	fm Frecuencia máquina w (rad/s)	Revisión de resonancia fm/fo	Amplitud calculada mm	Amplitud de software mm	% de error entre amplitudes (Excel vs software)
Vertical Z	0.16	0.0016	0.86	0.86	0.2%
Horizontal X	0.16	0.0018	2	1.9	5.0%
Horizontal Y	0.16	0.0018	0.16	0.16	1.3%
Giro alrededor Y	0.16	0.0007	-	-	-
Giro alrededor X	0.16	0.0014	-	-	-
Torsión	0.16	0.0009	-	-	-

Fuente: Autor

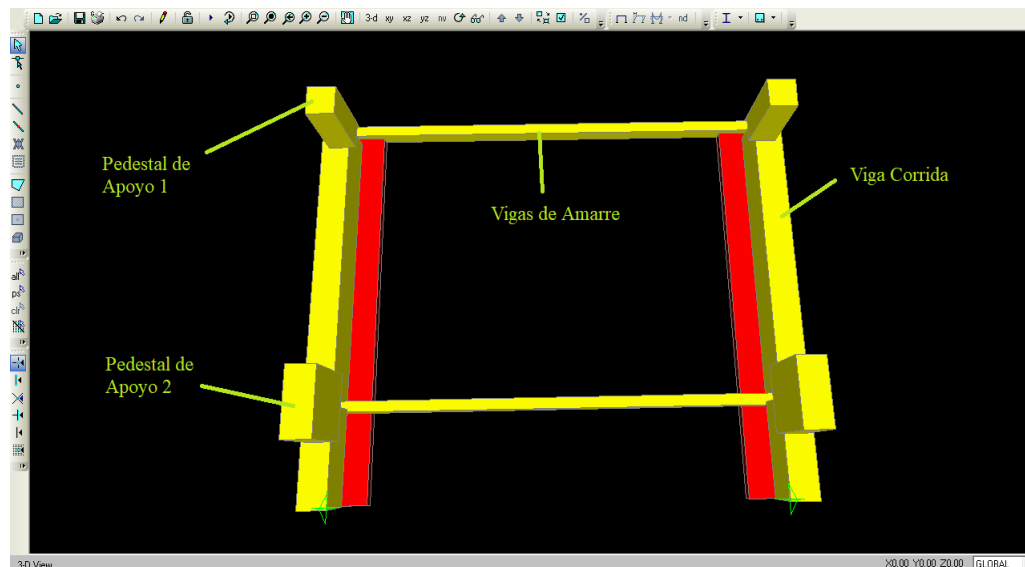
## 6.4 DISEÑO DE CIMENTACIONES MEDIANTE SOFTWARE SAP2000 Y SAFE

En este capítulo realizaremos un modelo de las cimentaciones tanto para el sistema de carga en caliente, como para la mesa de enfriamiento galopante a través de los programas comerciales SAP2000 y SAFE con el objetivo de afinar el diseño de las cimentaciones en estudio mencionadas, puesto que, se requiere el dimensionamiento acorde con las solicitaciones presentadas por los ingenieros mecánicos fabricantes de la maquinaria, los mismos que nos facilitaron la información de los parámetros del equipo, así como un resumen de cargas actuantes. Además, en base al estudio dinámico del comportamiento del sistema Máquina-cimentación-suelo presentados en capítulos anteriores nos permiten diseñar a las cimentaciones como un caso de análisis pseudoestático.

### 6.4.1 DISEÑO EN SAP2000 DE LA CIMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CARGA EN CALIENTE

A continuación, presentaremos el procedimiento que se realizó para los cálculos del diseño de la cimentación del sistema de carga en caliente mediante SAP2000 considerando parámetros estructurales como momentos máximos, cortes máximos y resistencias límites de los elementos que conforman la estructura.

Paso 1. Se realiza el modelado de la cimentación de carga en caliente con la geometría presentada anteriormente en los capítulos:



*Figura 85 Modelado en SAP 2000 de la cimentación de carga en caliente*

**Fuente: Autor**

Paso 2. Una vez ingresada la geometría y dimensiones del cimiento se procede a colocar el material de la estructura, que en este caso es hormigón de 280 kg/cm<sup>2</sup> de resistencia y acero de refuerzo de 4200 kg/cm<sup>2</sup>.

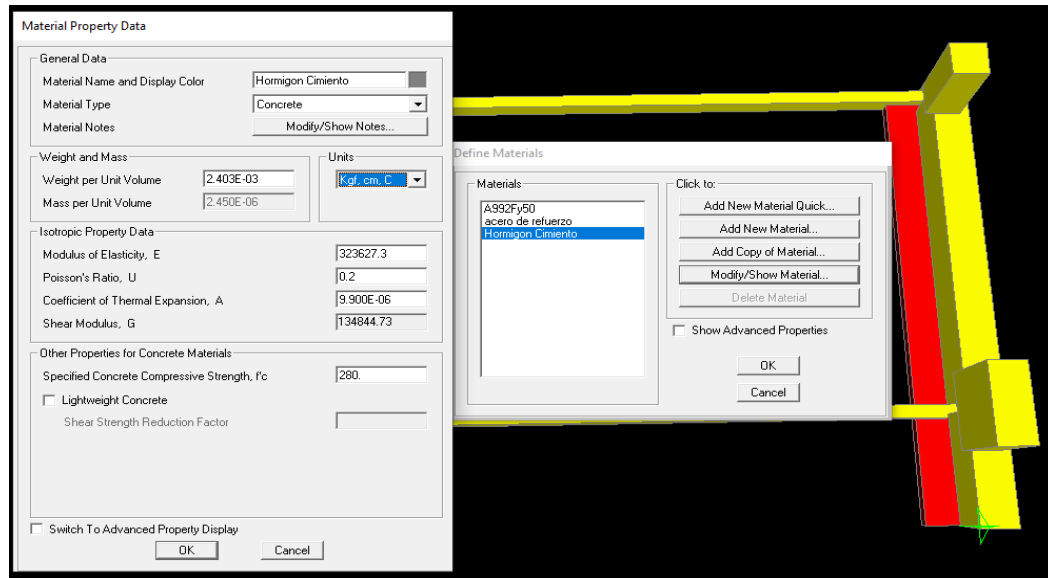


Figura 86 Ingreso del tipo de material para cimentación de carga en caliente

Fuente: Autor

Paso 3. Colocación de tipos de carga y combinaciones de carga en base a normativa. Las cargas entregadas por la empresa incluyen todas las cargas que actúan en la cimentación y serán denominadas sobrecargas.

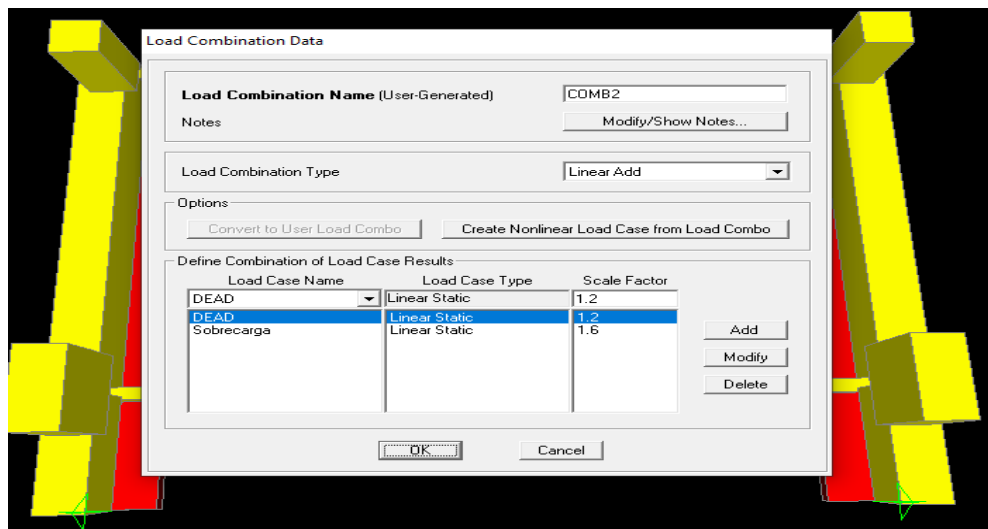
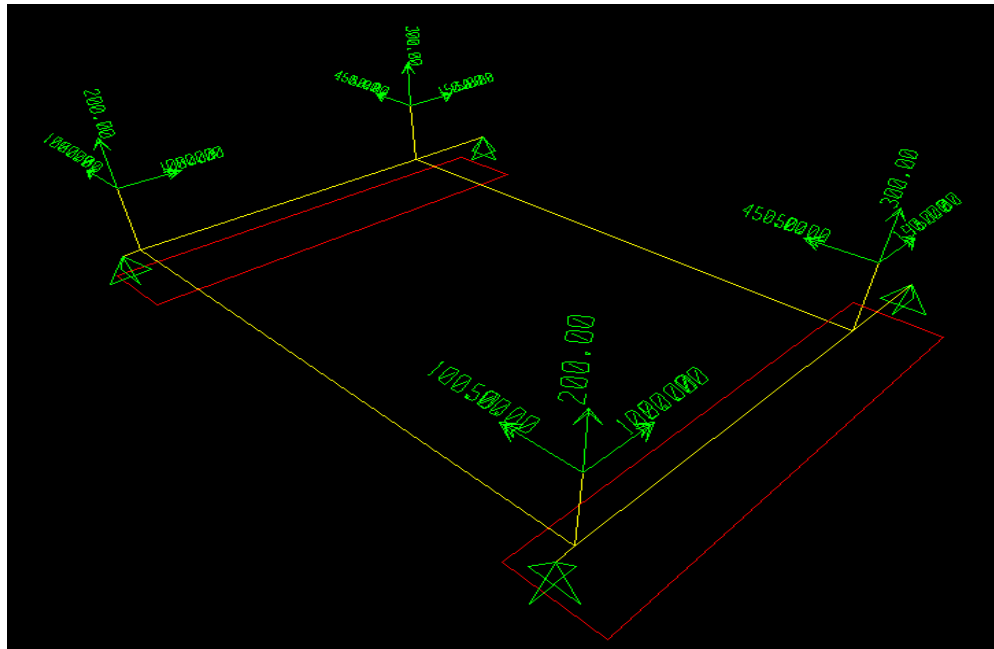


Figura 87 Combinación de cargas en Sistema de carga en caliente

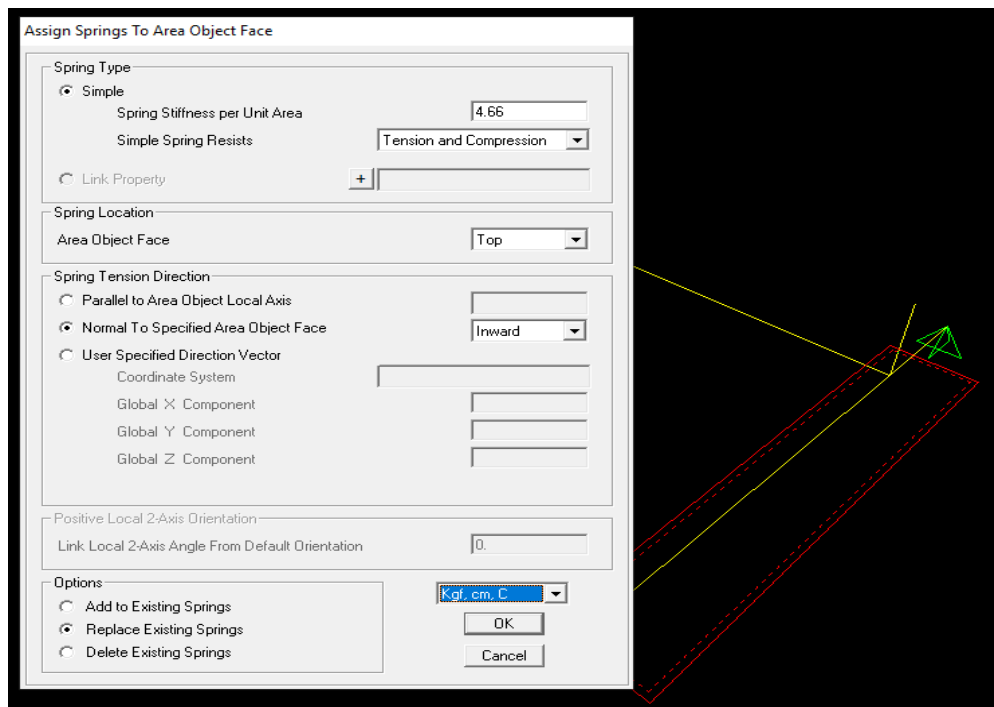
Fuente: Autor



*Figura 88 Aplicación de Cargas en Cimentación del Sistema de Carga en Caliente*

**Fuente: Autor**

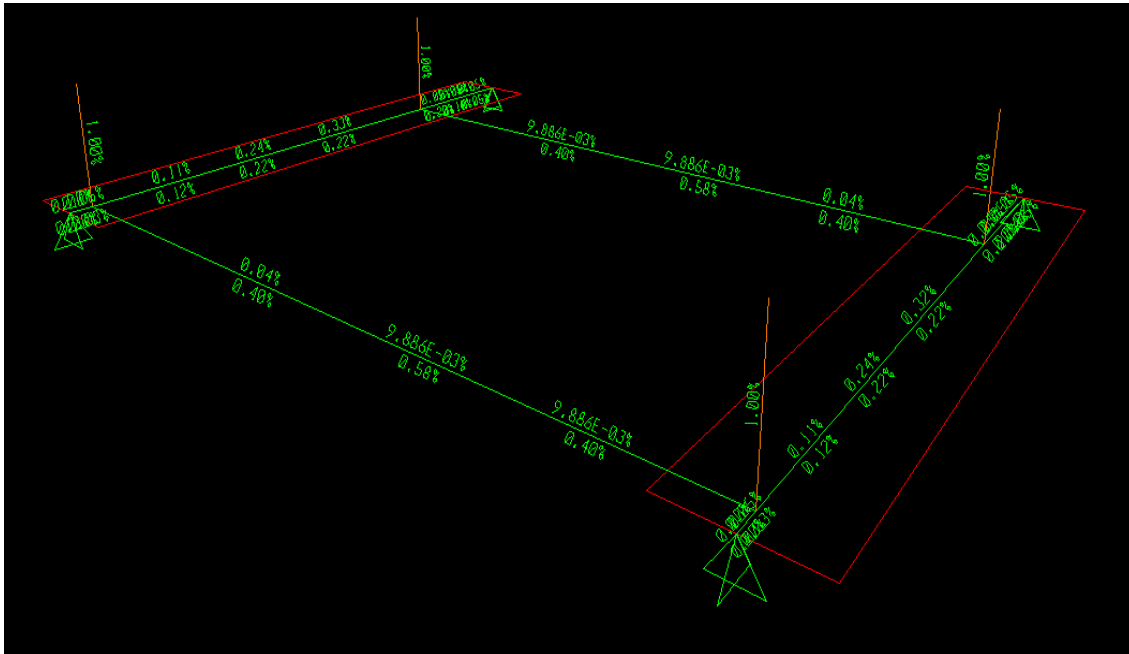
Paso 4. En vista de que se debe considerar el suelo para la cimentación, ingresaremos el módulo de balasto en forma de resortes establecidos en el programa.



*Figura 89 Ingreso del módulo de balasto para cimentación de la carga en caliente*

**Fuente: Autor**

Paso 5. Ingresada toda la información procedemos a simular el programa para que nos presente los resultados del diseño. El programa trabaja en base a las normas ACI 318, las cuales nos presentan los siguientes resultados:



*Figura 90 Diseño de la Cimentación del sistema de carga en caliente*

**Fuente: Autor**

Como se puede observar la cimentación cumple con todas las solicitaciones de diseño establecidas por el reglamento ACI 318 como son: secciones optimas, resistencia a la compresión del hormigón y fluencia del acero, las cuales nos verifica que las dimensiones de los elementos establecidos se encuentran trabajando adecuadamente sin que se produzca fallas en los elementos. El programa, además, nos presenta los momentos y cortes máximos que nos permitirán colocar la cantidad de acero necesario en la cimentación.



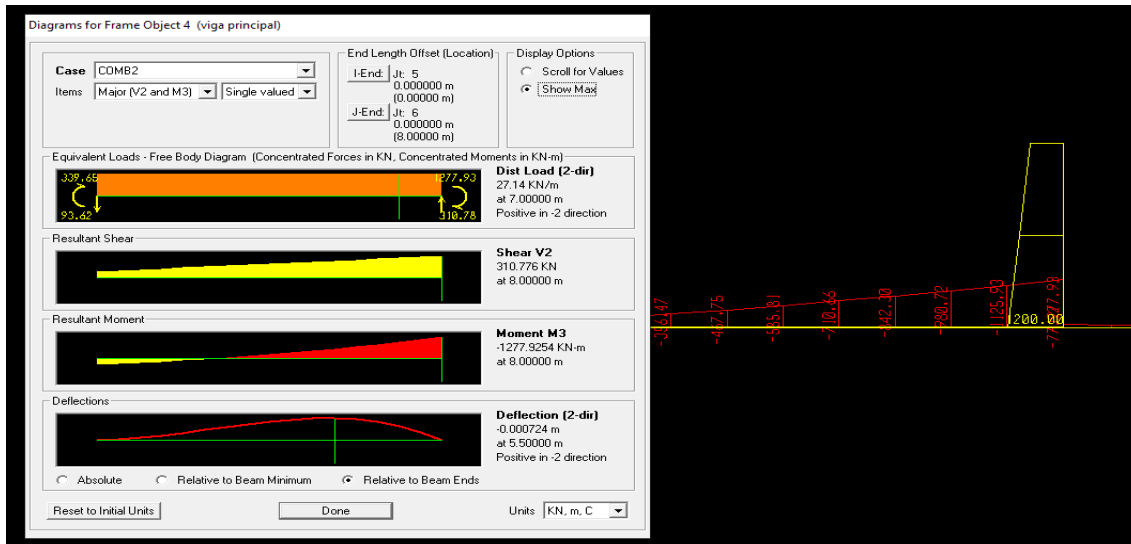


Figura 91 Momentos y Cortes Máximos de la cimentación de carga en caliente

Fuente: Autor

Paso 6. Una vez realizado el diseño en SAP2000 se exportará todas las fuerzas al programa de SAFE para una verificación de la resistencia de los elementos de la cimentación y también una verificación de la capacidad portante del suelo con el fin de evitar que las cargas excedan la capacidad calculada anteriormente.

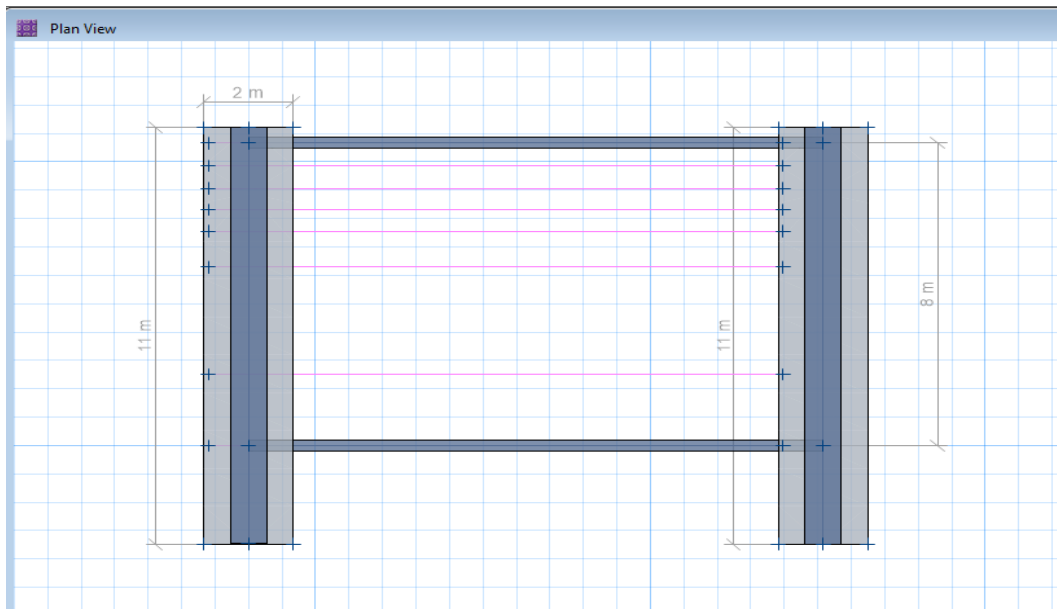


Figura 92 Modelado de Cimentación de Carga en caliente en SAFE

Fuente: Autor

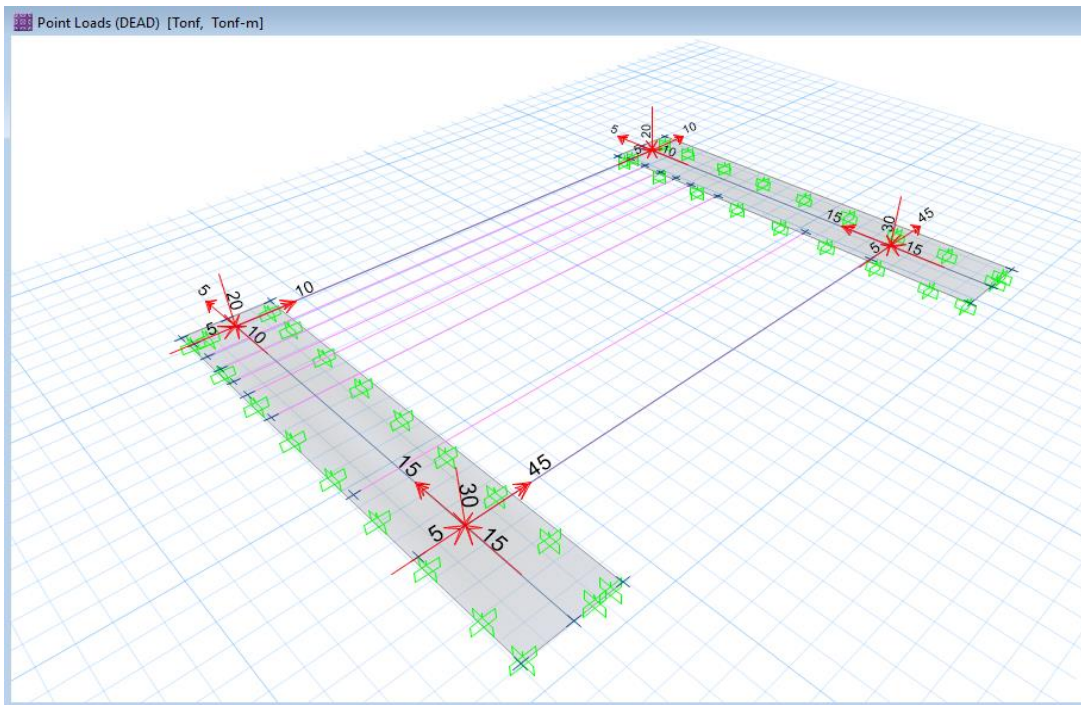


Figura 93 Exportación de las Cargas del sistema de carga en caliente al programa SAFE

Fuente: Autor

Paso 7. Al igual que SAP 2000 para poder revisar la interacción del suelo, ingresaremos el valor del coeficiente de balasto que nos permita identificar la capacidad admisible a la que se encuentra sometido el suelo de desplante.

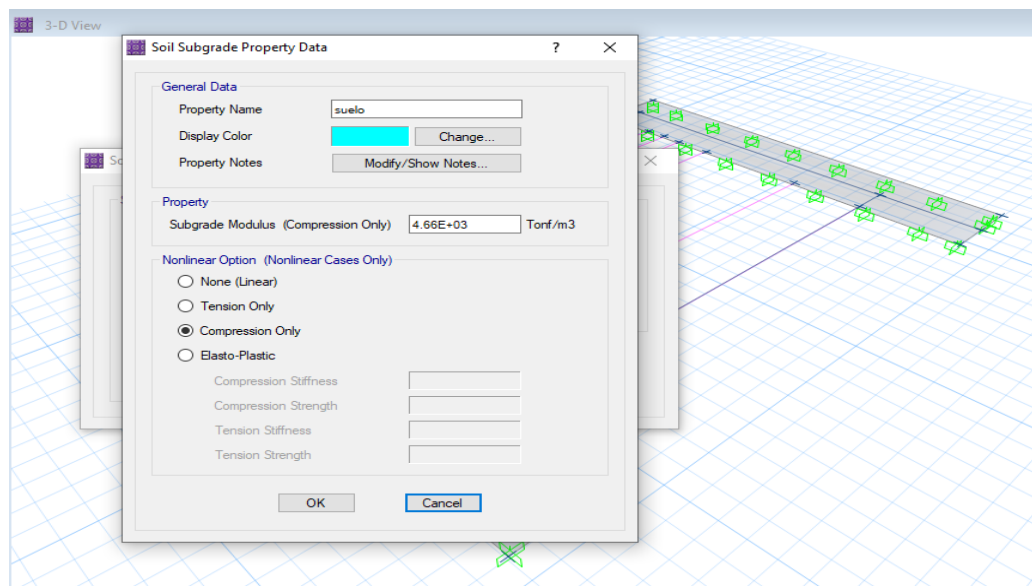
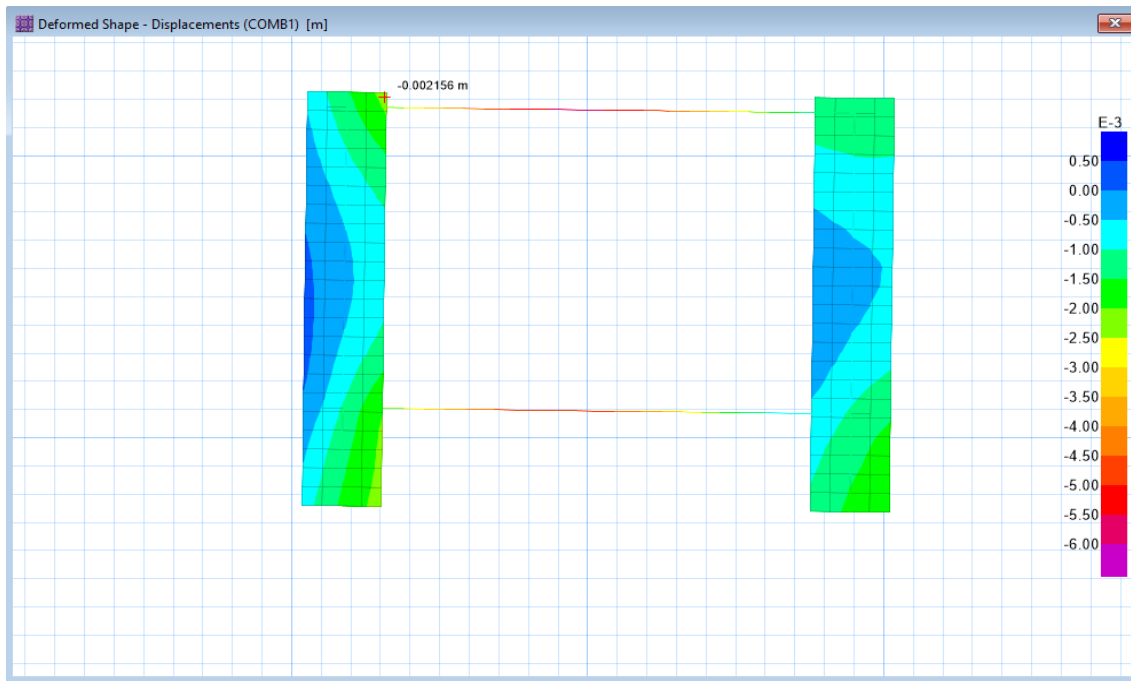


Figura 94 Ingreso del módulo de balasto en SAFE del sistema de carga en caliente

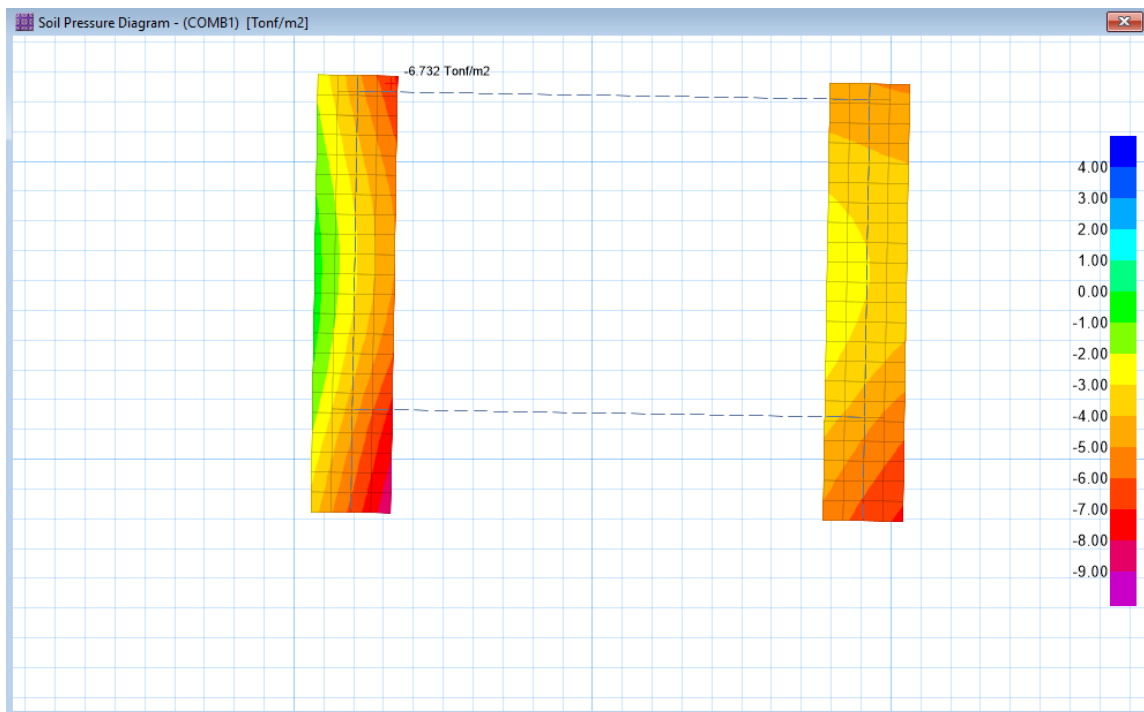
Fuente: Autor

Paso 8. Presentación de resultados generados por el programa:



*Figura 95 Deformación Producida en Cimentación de carga en caliente*

**Fuente: Autor**



*Figura 96 Diagrama de presión del suelo de desplante de cimentación de carga en caliente*

**Fuente: Autor**

Se puede observar que las presiones generadas en el suelo de desplante no superan la capacidad de carga admisible presentada anteriormente de  $7.7 \text{ t/m}^2$ .

Además, los asentamientos que presenta el programa no superan al asentamiento exigido por la empresa de 6 mm.

Paso 9. Obtención de momentos y cortes:

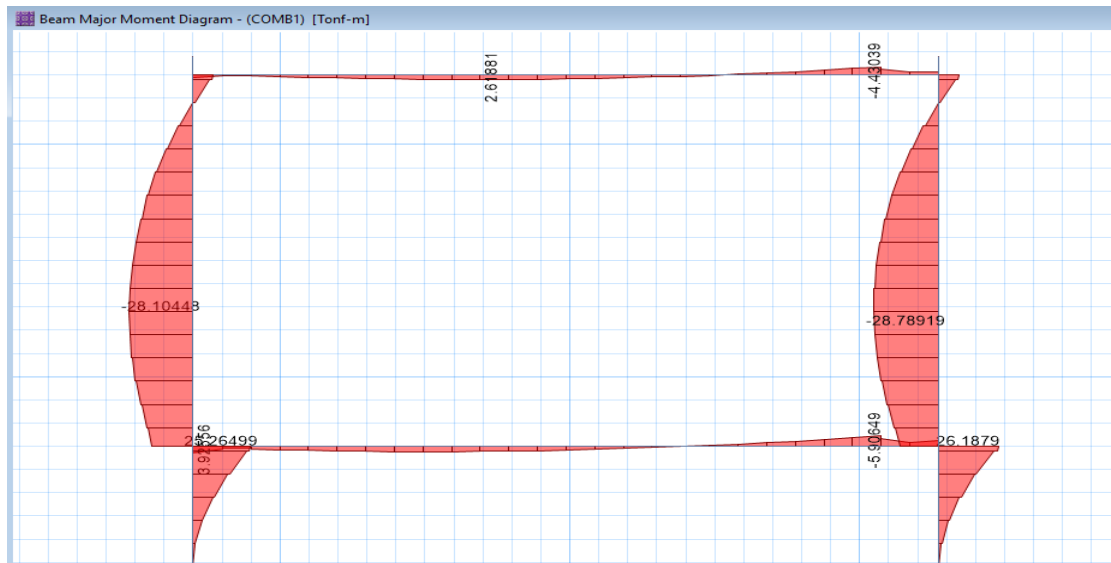


Figura 97 Diagramas de Momentos máximos producidos en las vigas de la cimentación de carga en caliente

Fuente: Autor

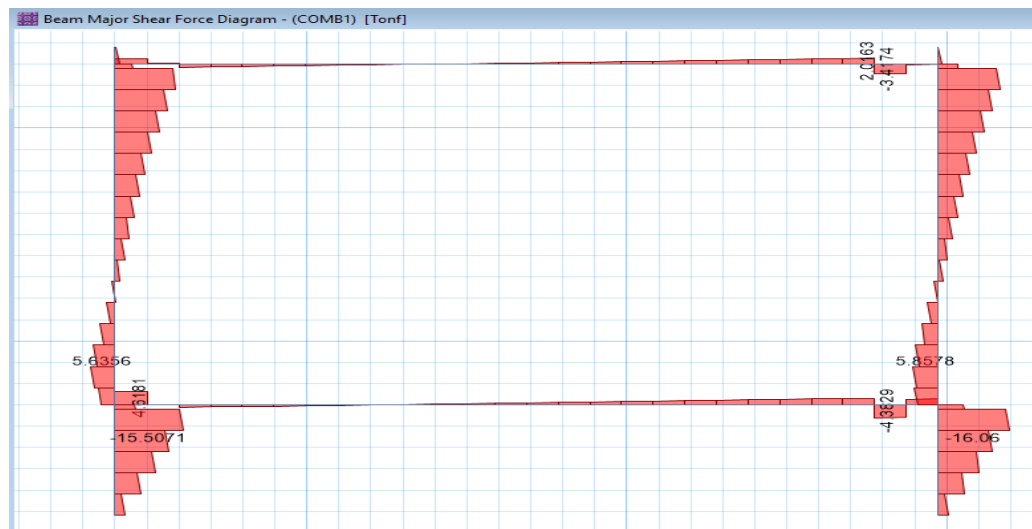


Figura 98 Diagrama de Cortes máximos de la cimentación de carga en caliente

Fuente: Autor

Paso 10. Determinación del acero de refuerzo necesario para la subestructura del sistema de carga en caliente.

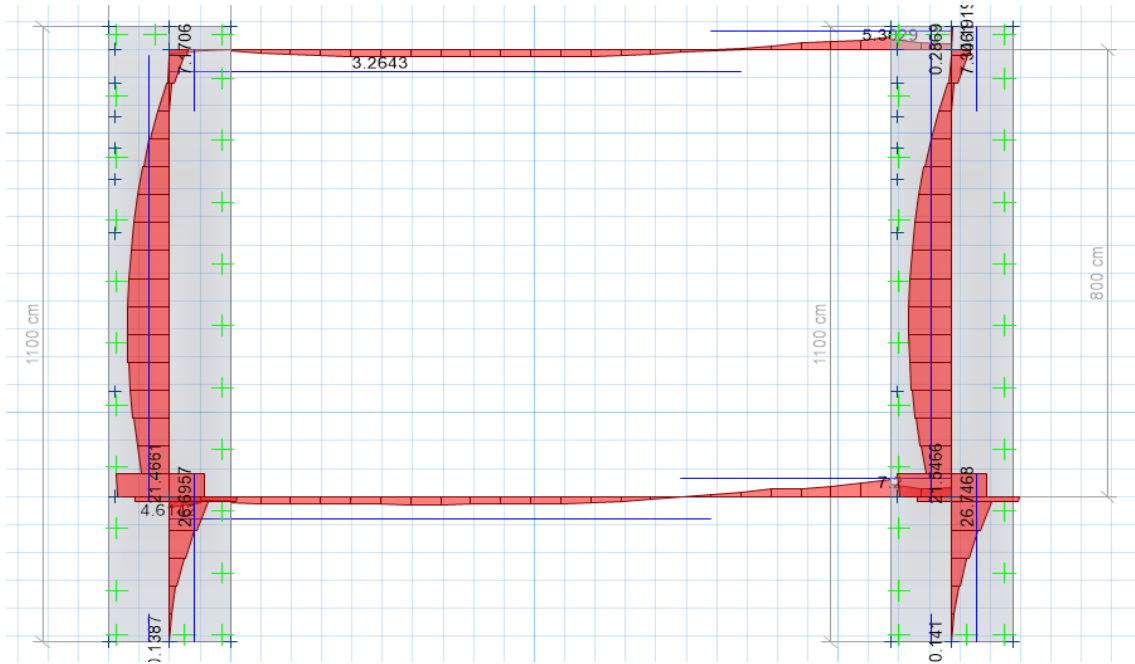


Figura 99 Diagrama de Aceros de refuerzo en vigas requeridos para la cimentación de carga en caliente

Fuente: Autor

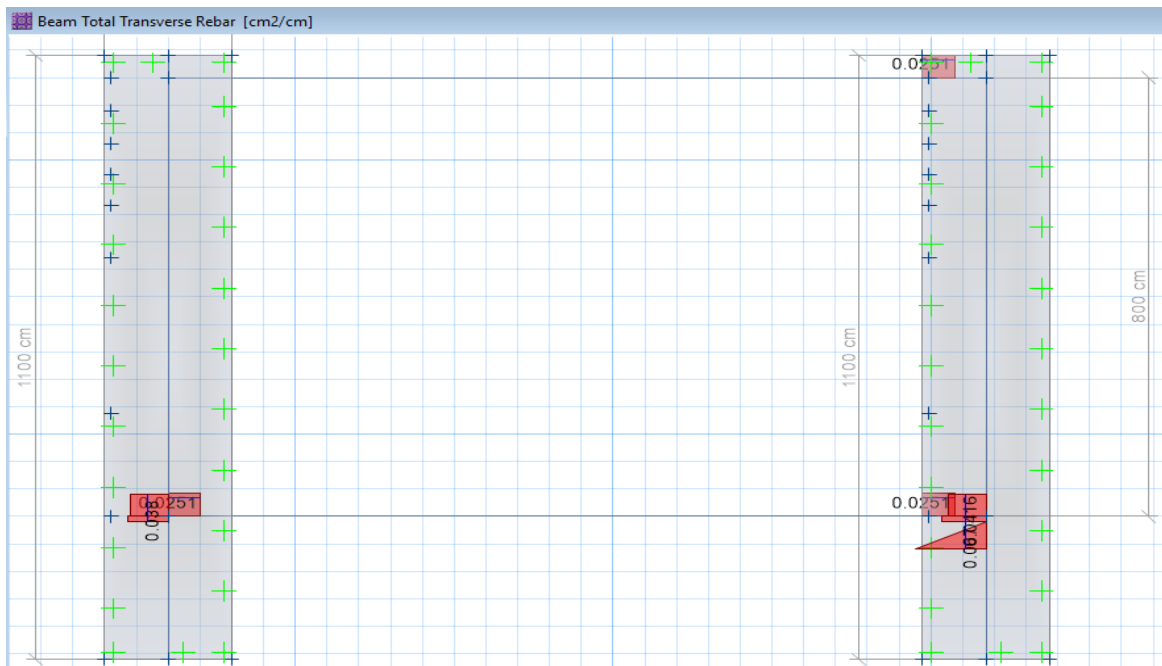


Figura 100 Diagrama de Aceros transversal en vigas requeridos para la cimentación de carga en caliente

Fuente: Autor

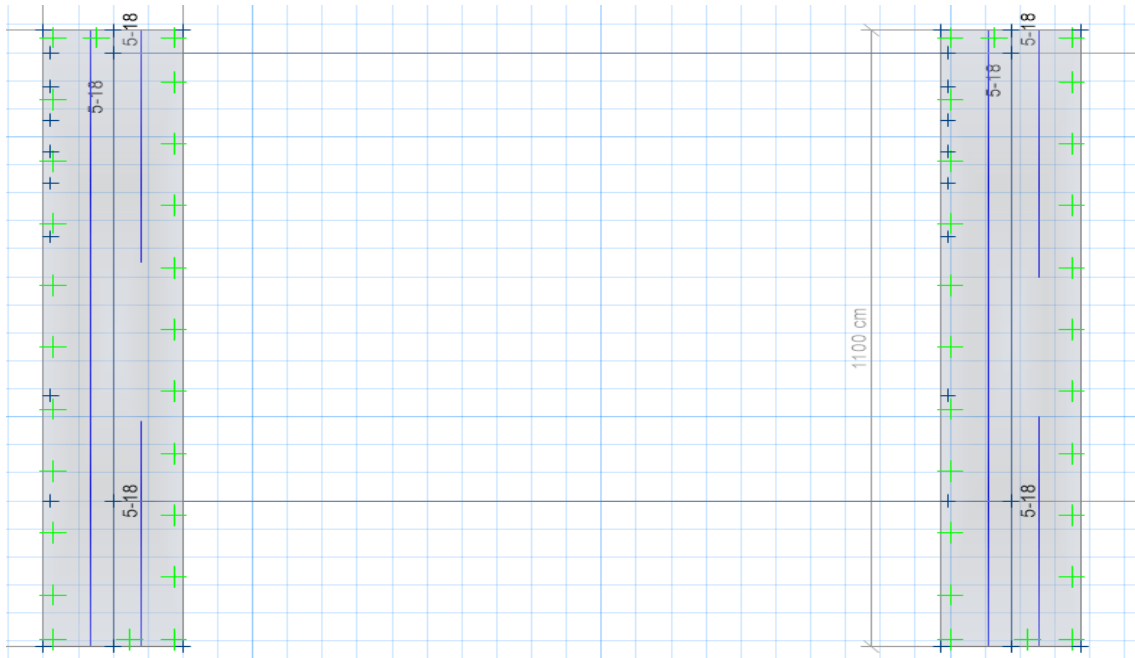


Figura 101 Acero de Refuerzo en zapatas corridas de la cimentación de la carga en caliente

Fuente: Autor

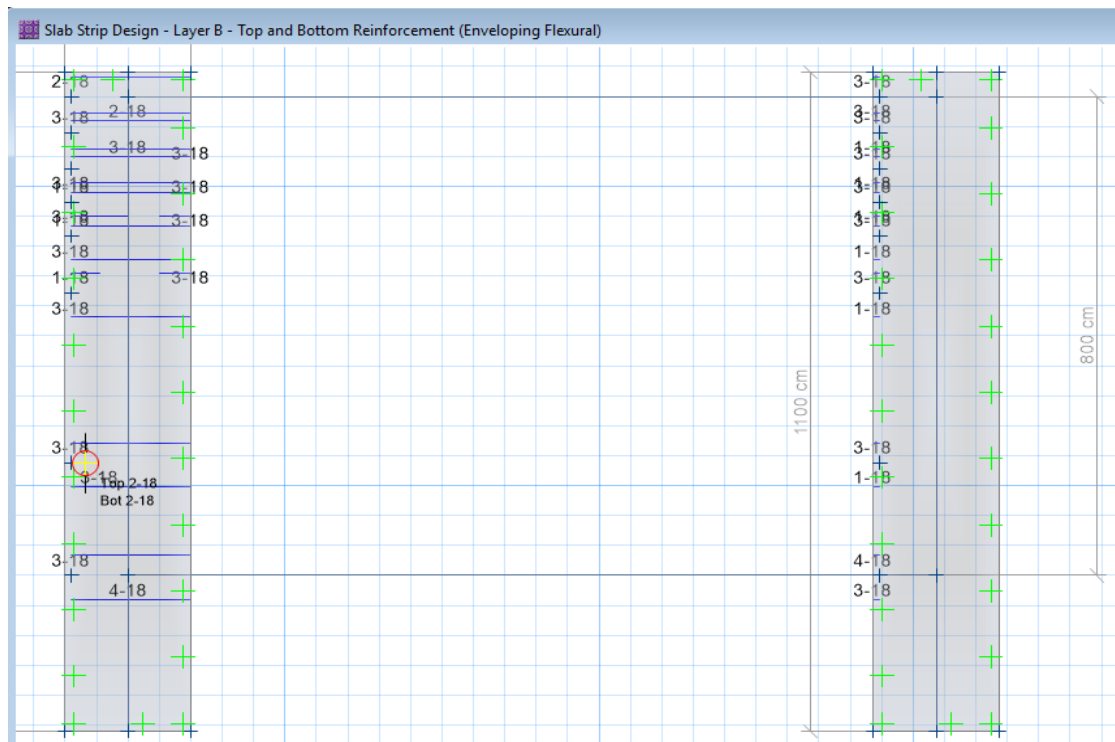


Figura 102 Acero Transversal en zapatas corridas de la cimentación de la carga en caliente

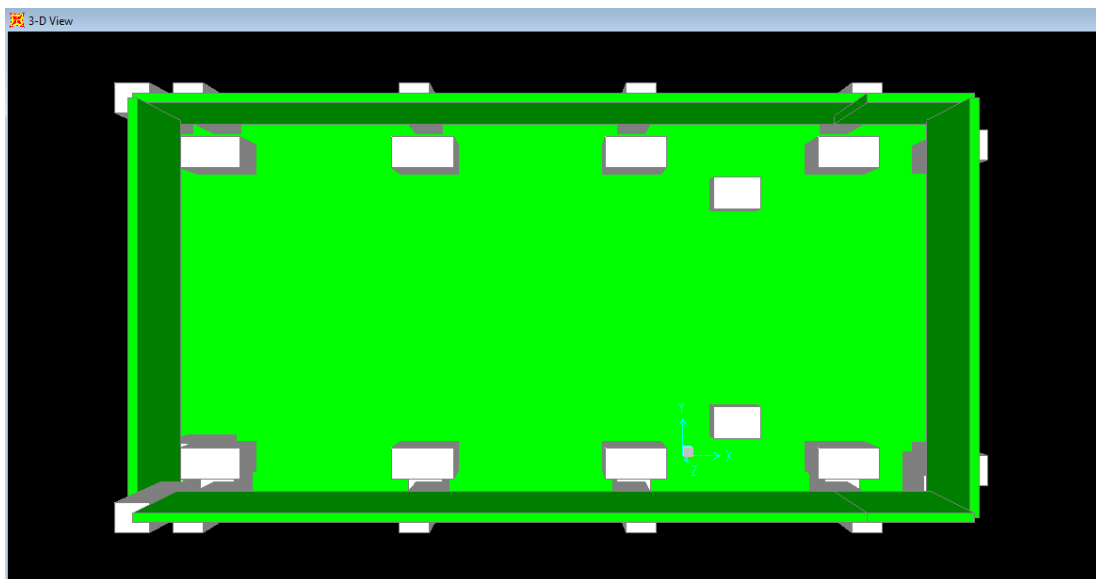
Fuente: Autor

Al concluir con el diseño de la cimentación, se determinó con ayuda del programa las cuantías de acero que serán requeridos para la construcción como muestra la figura 89, sin embargo, por petición directa de la empresa se nos ha solicitado realizar los planos de la cimentación utilizando varillas  $\varnothing$  de 25 debido a que la planta cuenta con un excedente de este material y así conseguir abaratar costos.

#### **6.4.2 DISEÑO EN SAP 2000 DE LA CIMENTACIÓN DE LA MESA DE ENFRIAMIENTO GALOPANTE**

A continuación, presentaremos el procedimiento que se realizó para los cálculos del diseño de la cimentación del sistema de carga en caliente mediante SAP2000 considerando parámetros estructurales como momentos máximos, cortes máximos y resistencias límites de los elementos que conforman la estructura.

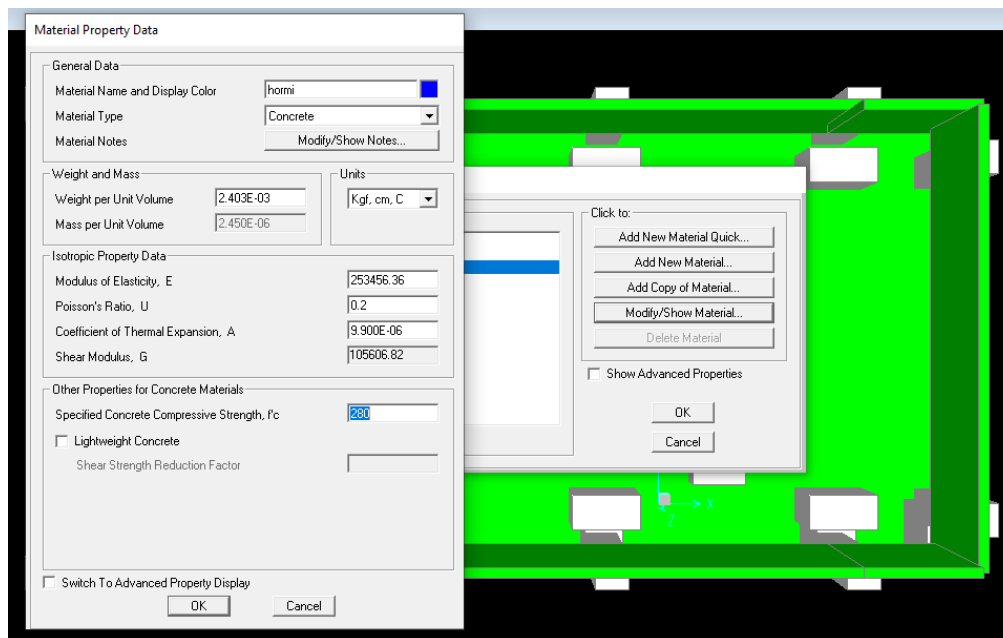
Paso 1. Se realiza el modelado de la cimentación de la mesa de enfriamiento con la geometría propuesta anteriormente en los capítulos:



*Figura 103 Modelado en SAP 2000 de la cimentación de la mesa de enfriamiento*

**Fuente: Autor**

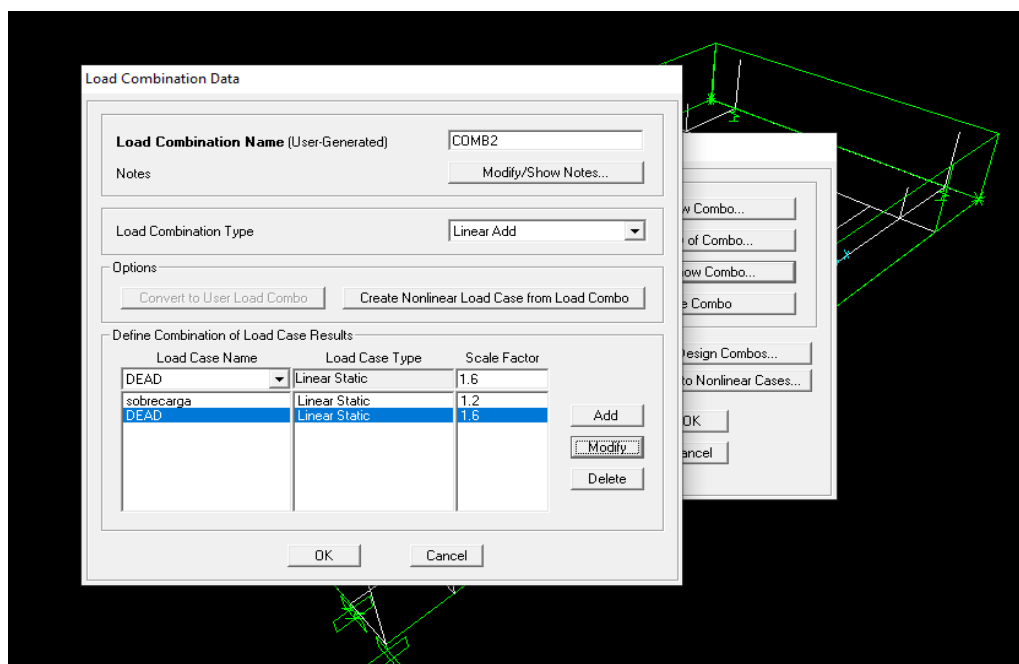
Paso 2. Una vez ingresada la geometría y dimensiones del cimientó se procede a colocar el material de la estructura, que en este caso es hormigón de  $280 \text{ kg/cm}^2$  de resistencia y acero de refuerzo de  $4200 \text{ kg/cm}^2$ .



*Figura 104 Ingreso del tipo de material para cimentación de carga en caliente*

**Fuente: Autor**

Paso 3. Colocación de tipos de carga y combinaciones de carga en base a normativa. Las cargas entregadas por la empresa incluyen todas las cargas que van actuar en la cimentación y serán denominadas sobrecargas.



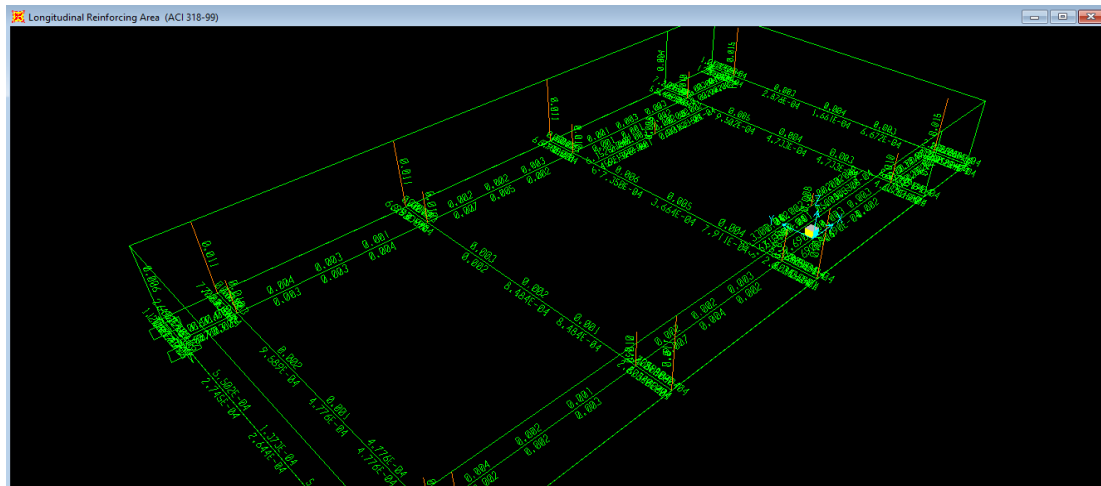
*Figura 105 Combinación de cargas en Mesa de enfriamiento*

**Fuente: Autor**





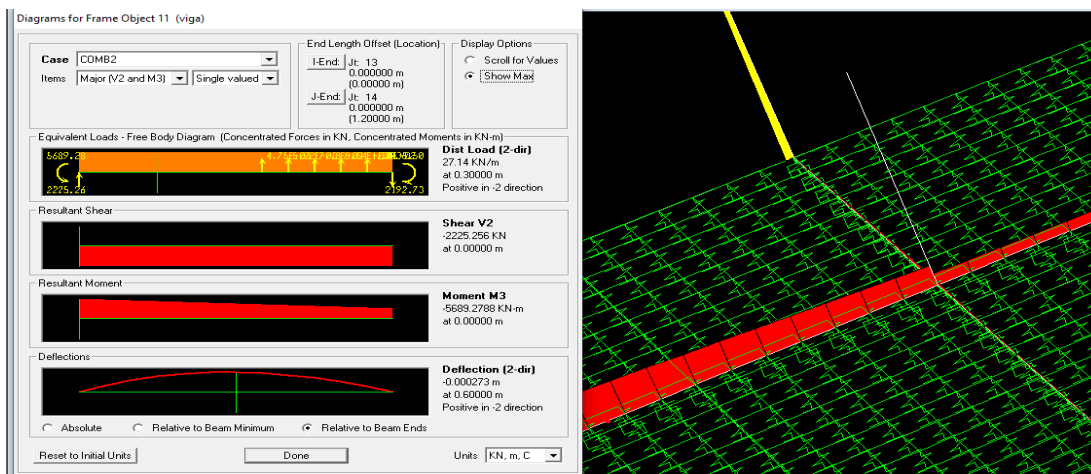
Paso 5. Ingresada toda la información procedemos a simular el programa para que nos presente los resultados del diseño. El programa trabaja en base a las normas ACI 318, las cuales nos presentan los siguientes resultados:



*Figura 108 Diseño de la Cimentación de la Mesa de Enfriamiento*

**Fuente: Autor**

Como se puede observar la cimentación cumple con todas las solicitaciones de diseño establecidas por el reglamento ACI 318 como son: secciones optimas, resistencia a la compresión del hormigón y fluencia del acero, las cuales nos verifica que las dimensiones de los elementos establecidos se encuentran trabajando adecuadamente sin que se produzca fallas en los elementos. El programa, además, nos presenta los momentos y cortes máximos que nos permitirán colocar la cantidad de acero necesario en la cimentación.



*Figura 109 Momentos y Cortes Máximos de la cimentación de la Mesa de Enfriamiento*

**Fuente: Autor**

Paso 6. Una vez realizado el diseño en SAP 2000 se exportará todas las fuerzas al programa de SAFE para una verificación de la resistencia de los elementos de la cimentación y también una verificación de la capacidad portante del suelo con el fin de evitar que las cargas excedan la capacidad calculada anteriormente.

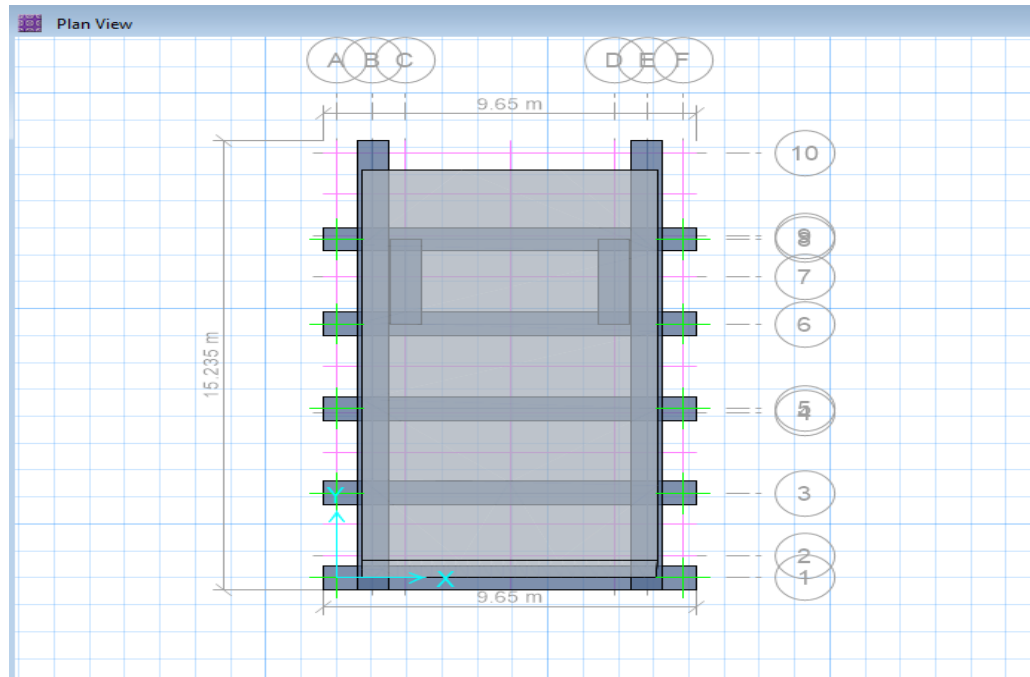


Figura 110 Modelado de Cimentación de la Mesa de enfriamiento en SAFE

Fuente: Autor

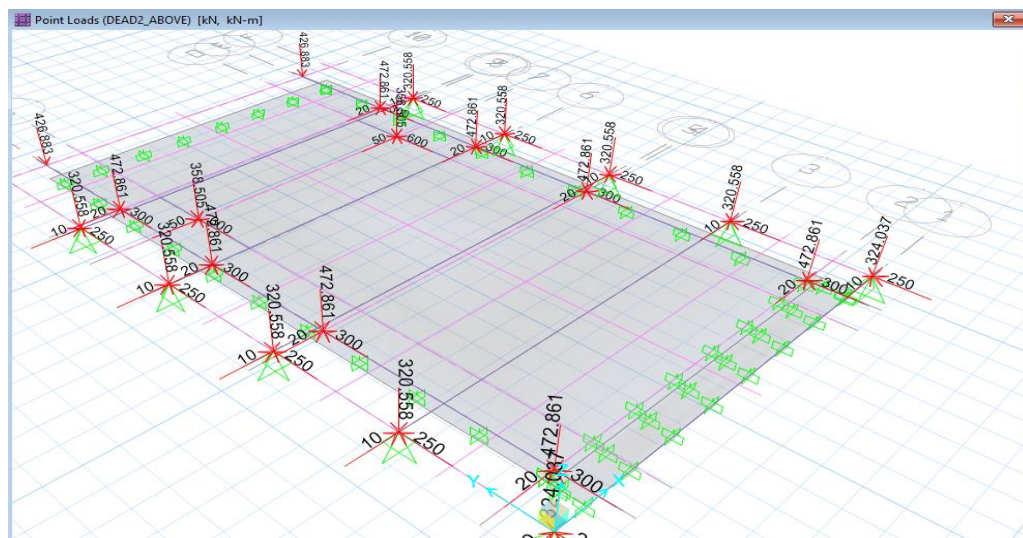
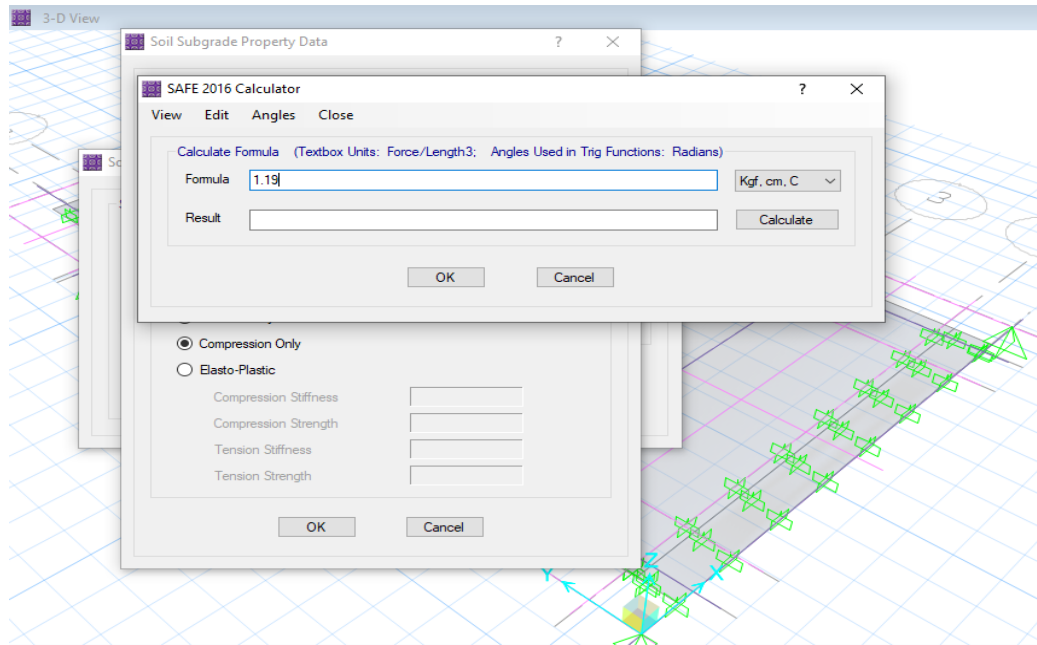


Figura 111 Exportación de las Cargas de la Mesa de Enfriamiento al programa SAFE

Fuente: Autor

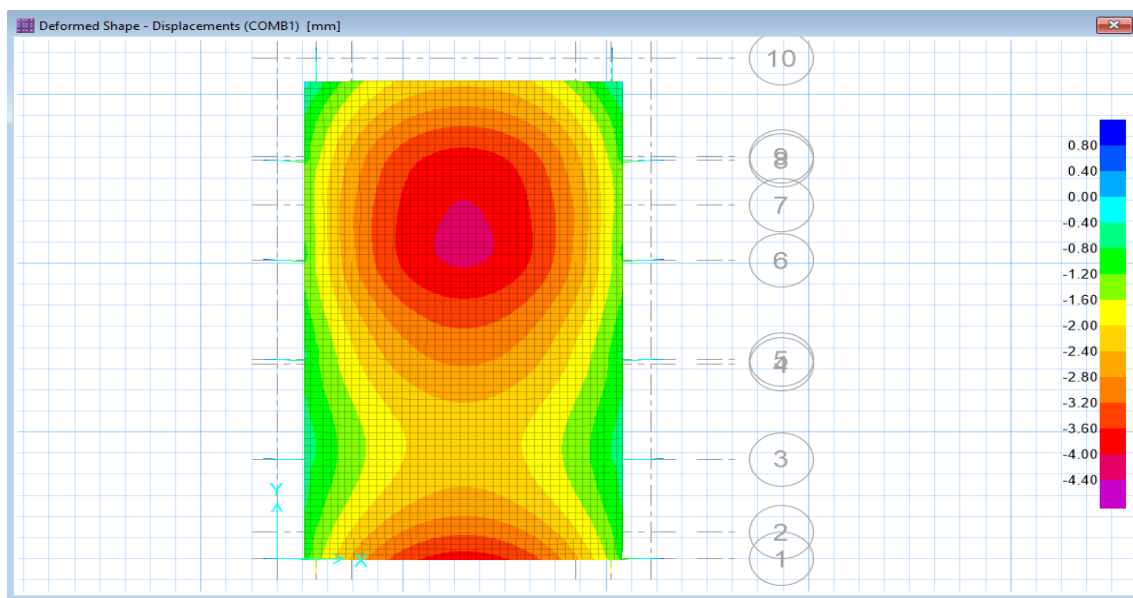
Paso 7. Al igual que SAP 2000 para poder revisar la interacción del suelo, ingresaremos el valor del coeficiente de balasto que nos permita identificar la capacidad admisible a la que se encuentra sometido el suelo de desplante.



*Figura 112 Ingreso del módulo de balasto en SAFE de la Mesa de enfriamiento*

**Fuente: Autor**

Paso 8. Presentación de resultados generados por el programa:



*Figura 113 Deformación Producida en Cimentación de la Mesa de Enfriamiento*

**Fuente: Autor**

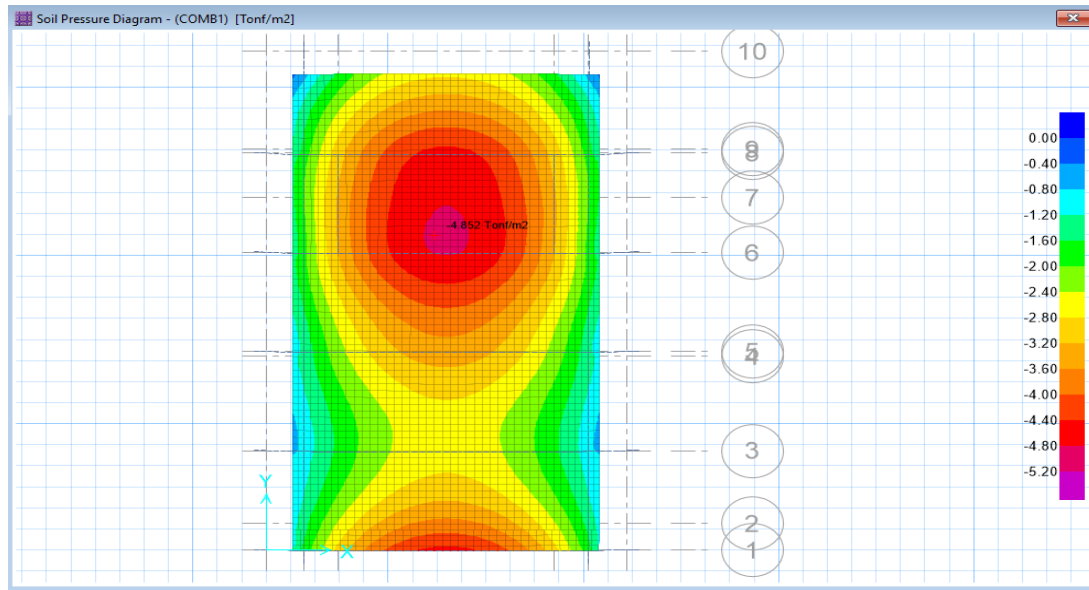


Figura 114 Diagrama de presión del suelo de desplante de cimentación de la Mesa de Enfriamiento

Fuente: Autor

Se puede observar que las presiones generadas en el suelo de desplante no superan la cantidad de la capacidad de carga admisible presentada anteriormente de  $4.96 \text{ Ton/m}^2$ . Además, los asentamientos que presenta el programa no superan al asentamiento exigido por la empresa de 6 mm.

Paso 9. Obtención de momentos y cortes:

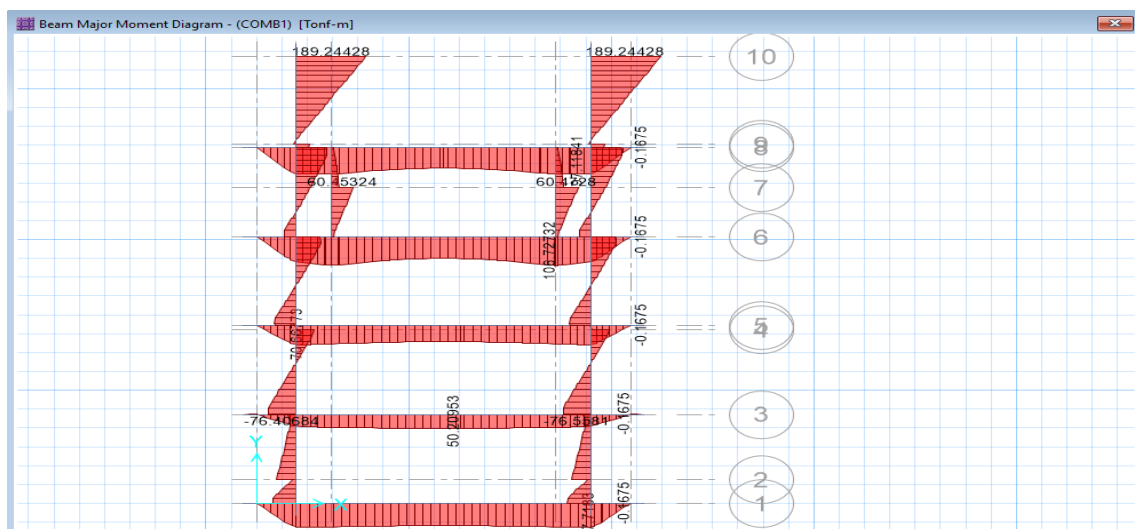
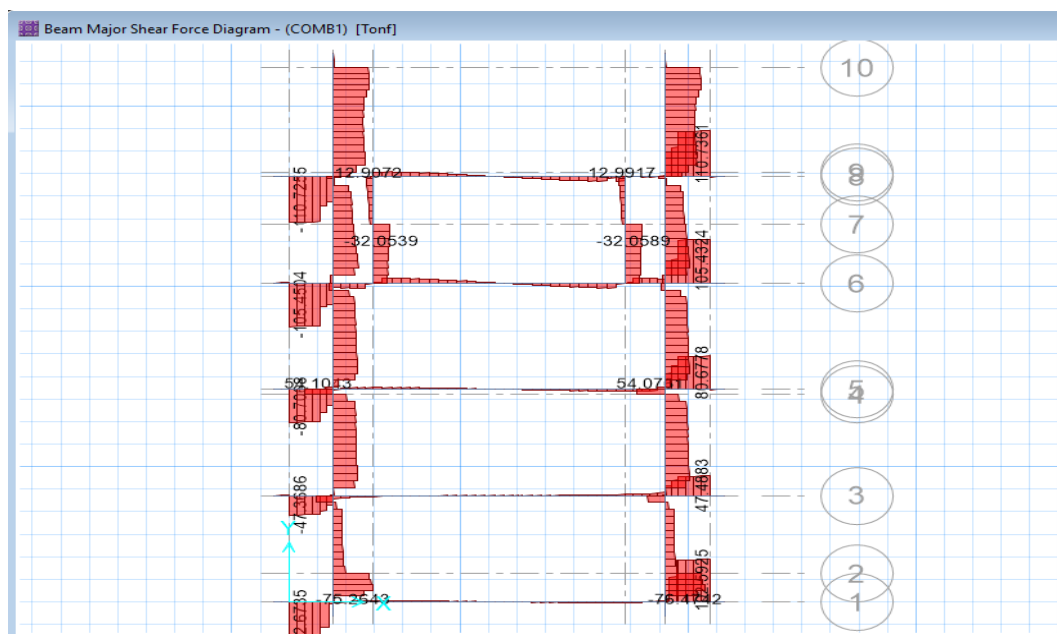


Figura 115 Diagramas de Momentos máximos producidos en las vigas de la cimentación de la Mesa de Enfriamiento

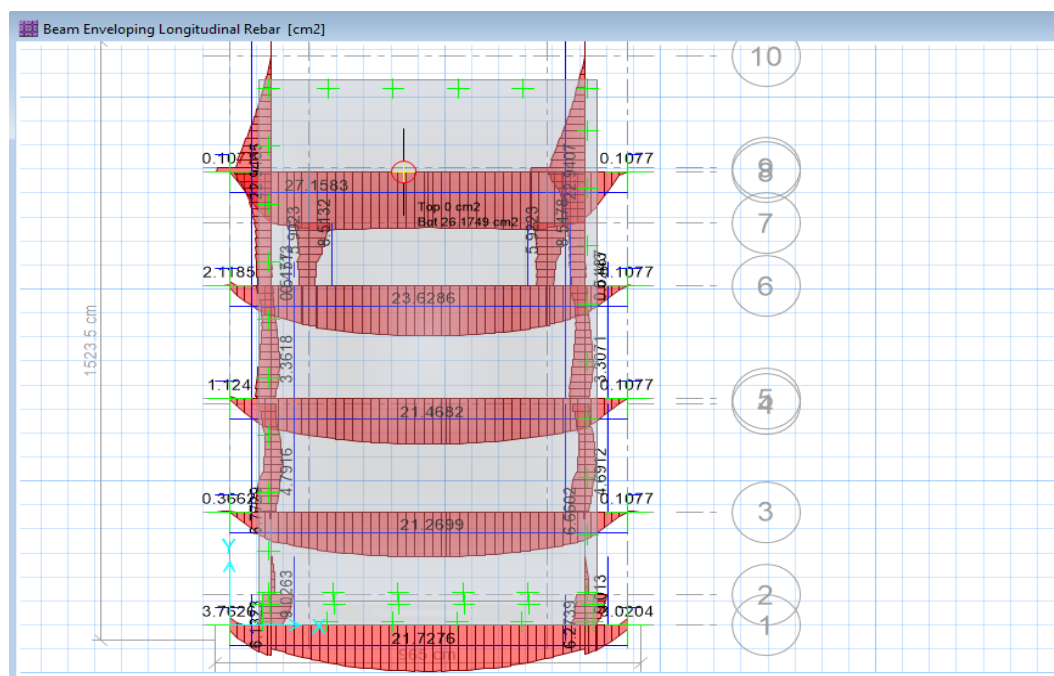
Fuente: Autor



*Figura 116 Diagrama de Cortes máximos de la cimentación de carga en caliente*

**Fuente:** Autor

Paso 10. Determinación del acero de refuerzo necesario para la subestructura de la mesa de enfriamiento.



*Figura 117 Diagrama de Aceros de refuerzo en vigas requeridos para la cimentación de la Mesa de Enfriamiento*

**Fuente: Autor**

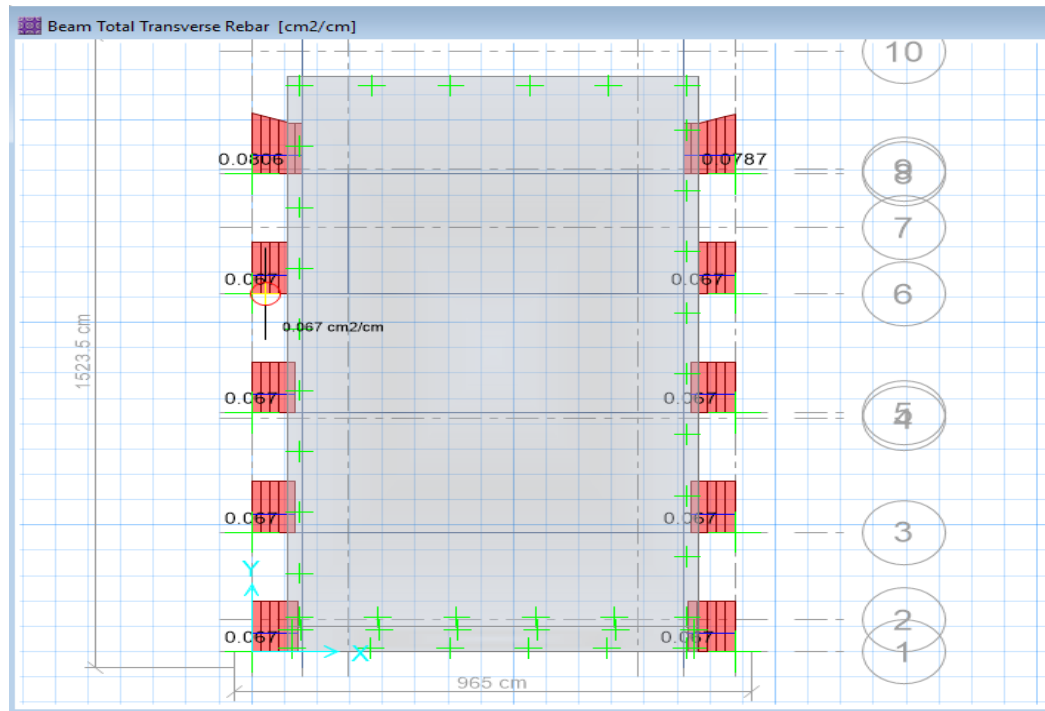


Figura 118 Diagrama de Aceros transversal en vigas requeridos para la cimentación de la Mesa de Enfriamiento

Fuente: Autor

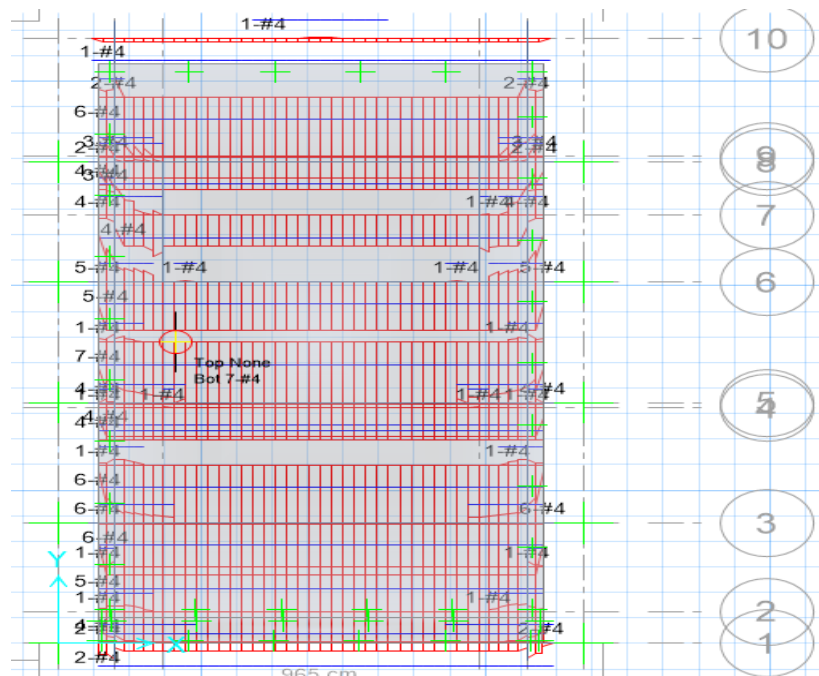
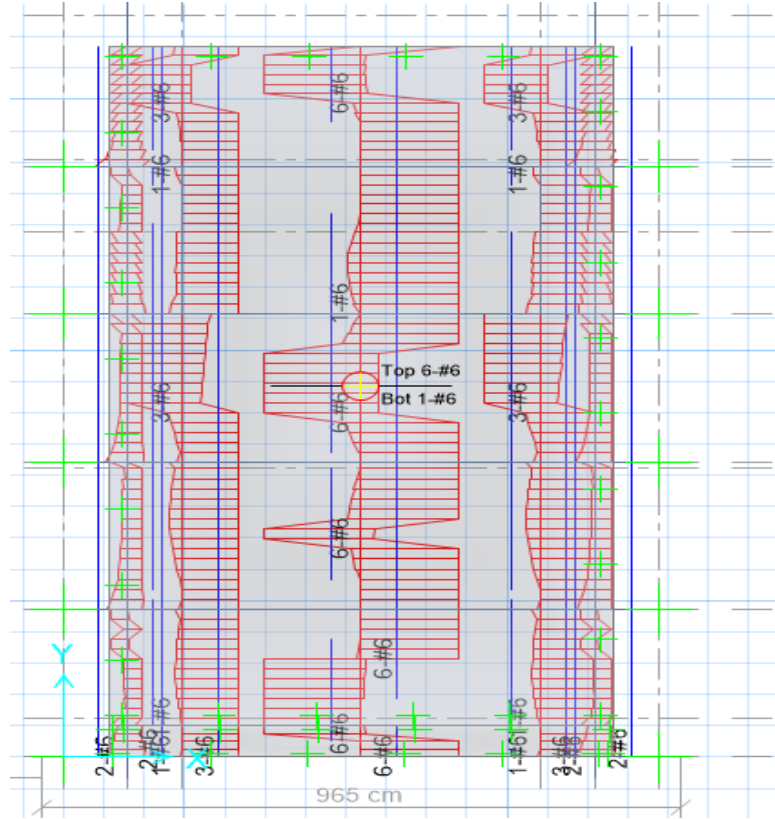


Figura 119 Acero de Refuerzo en losa de la cimentación de la Mesa de Enfriamiento

Fuente: Autor



*Figura 120 Acero Trasversal en la losa de la cimentación de la mesa de enfriamiento*

**Fuente: Autor**

## **6.5 PLANOS DE INGENIERIA Y DETALLES**

Los planos generados del diseño de las cimentaciones para la maquinaria planteada se presentarán a detalle en los posteriores anexos de planos.



## CAPITULO VII

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 7.1 CONCLUSIONES

Se comenzará mencionando que en base a los resultados obtenidos en los diseños y las verificaciones realizadas en relación a varios aspectos que intervienen en este tipo de cimentaciones destinadas a maquinaria industrial se cumplió con el objetivo planteado de dimensionar las subestructuras de tal forma que garantice la estabilidad y durabilidad de los nuevos equipos que se implantarán en la planta de NOVACERO para poder tener un mayor rendimiento en su producción. Dentro de las amplitudes calculadas tanto en el programa de Excel como en el del software comercial para la cimentación del sistema de carga en caliente se presentaron valores cercanos al 0.27 mm lo cual en base a la gráfica de límites permisibles para maquinaria, nos encontramos situados en el límite de Fácilmente Apreciable, esto es razonable si consideramos que estos equipos pertenecen a una planta industrial de producción y constantemente van a estar envueltos en vibraciones y amplitudes que serán sentidas por el personal que trabaja constantemente con ellas.

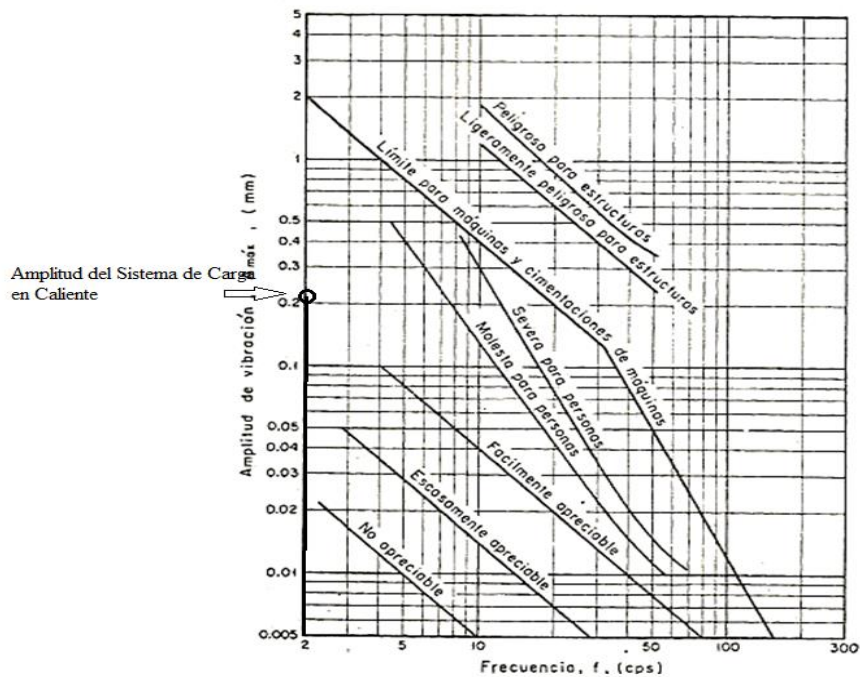


Figura 121 Límites de amplitud del deslizamiento en función de la frecuencia para el sistema de carga en caliente

Fuente: Autor

Tabla 31 Resumen de Resonancias y Amplitudes calculadas para la Cimentación de Carga en Caliente

MODO	fm Frecuencia máquina $\omega$ (rad/s)	fo Frecuencia calculada $\omega_c$ (rad/s) (ver en anexos)	Revisión de resonancia fm/fo	Amplitud calculada mm (ver en anexos)	Amplitud permisible mm	Observaciones
Vertical Z	1.05	142.95	0.0073	0.27	2	cumple
Horizontal X	1.05	114.26	0.0092	0.22	2	cumple
Horizontal Y	1.05	124.29	0.0084	0.07	2	cumple
Giro alrededor Y	1.05	156.78	0.0067	-	-	-
Giro alrededor X	1.05	43.79	0.0239	-	-	-
Torsión	1.05	234.90	0.0045	-	-	-

Fuente: Autor

De igual manera se presentó con ayuda del programa comercial las gráficas características de las frecuencias de los sistemas de cimentación y la ubicación en la que se encuentran las cimentaciones analizadas concluyendo que presentan frecuencias muy bajas y no se aproximan a las frecuencias de resonancia, lo cual es favorable ya que nos aseguran que por más vibración y amplitud que tenga el sistema de máquina-cimentación-suelo no se presentará resonancia en la subestructura.

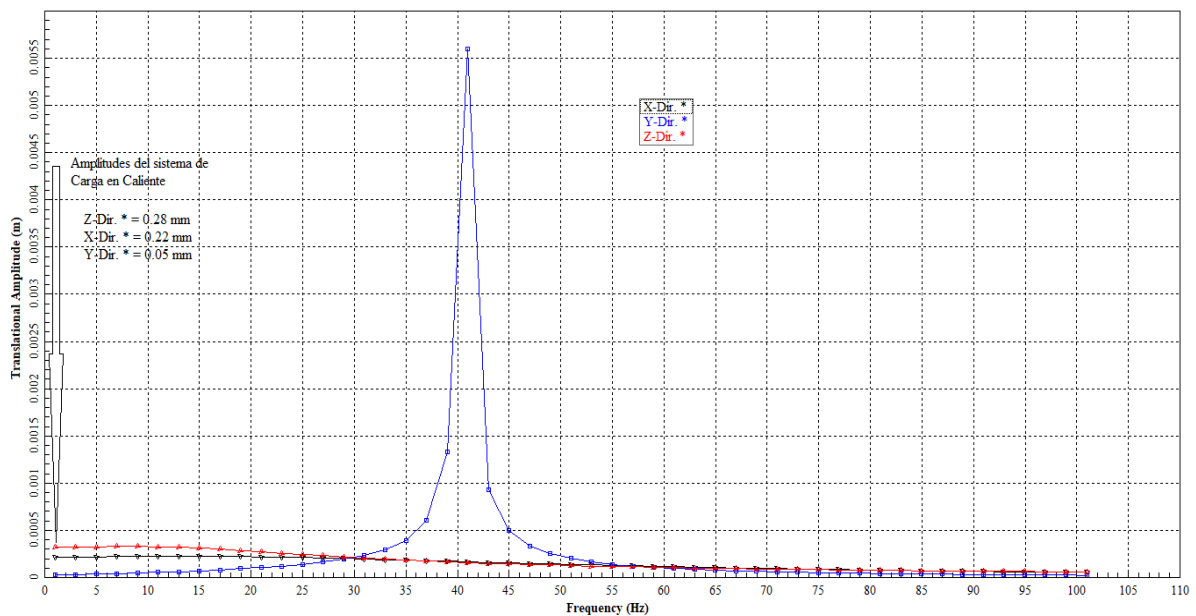
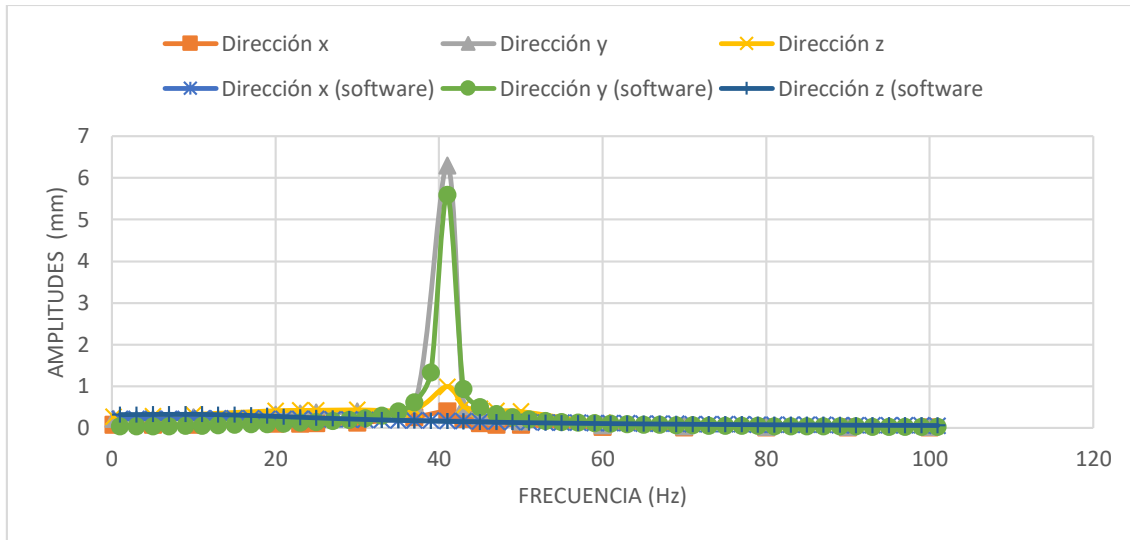


Gráfico 5 Amplitud del sistema de carga en caliente realizada por el software

Fuente: Autor



*Gráfico 6 Comparación de Amplitud del sistema de carga en caliente entre Excel y Software*

**Fuente: Autor**

Realizando una comparativa del gráfico 7, entre los resultados de los programas tanto en Excel como del software, notaremos que presentan una gran similitud en el rango de la baja frecuencia de 0.1667 Hz para el caso de la cimentación del sistema de carga en caliente en estudio; en Excel se muestra una amplitud de 0.27 mm en dirección z que es una de las más altas mientras que para el software se observa una amplitud de 0.28 mm para la frecuencia antes mencionada, lo cual representa una diferencia del 3%.

En la siguiente tabla se presenta una comparación entre amplitudes del sistema de Carga en caliente del programa comercial y el calculado manualmente:

*Tabla 32 Comparación de amplitudes del sistema de Carga en Caliente*

MODO	fm Frecuencia máquina $\omega$ (rad/s)	fo Frecuencia calculada $\omega_c$ (rad/s)	Revisión de resonancia fm/fo	Amplitud calculada mm	Amplitud de software mm	Amplitud permisible mm	Observaciones
Vertical Z	1.05	142.95	0.0073	0.27	0.28	2	cumple
Horizontal X	1.05	114.26	0.0092	0.22	0.22	2	cumple
Horizontal Y	1.05	124.29	0.0084	0.07	0.07	2	cumple
Giro alrededor Y	1.05	156.78	0.0067	-	-	-	-
Giro alrededor X	1.05	43.79	0.0239	-	-	-	-
Torsión	1.05	234.90	0.0045	-	-	-	-

**Fuente: Autor**

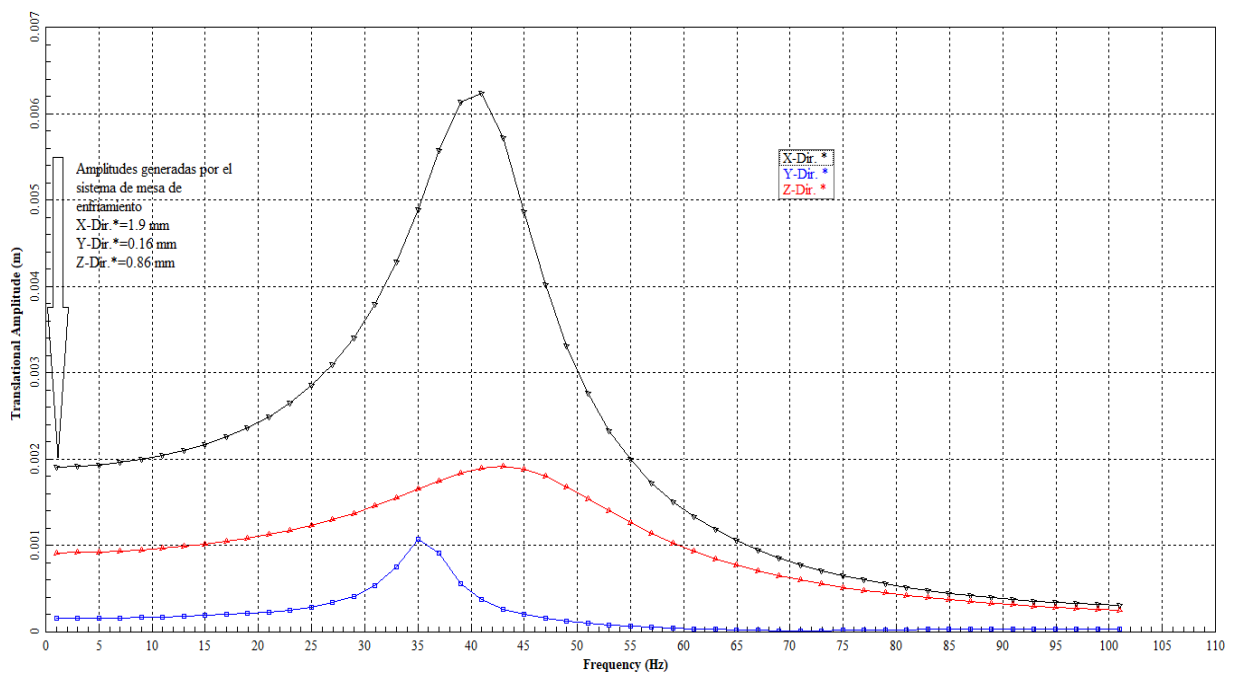
De la misma forma se determinó las amplitudes de la cimentación para la mesa de enfriamiento, la diferencia en esta cimentación fue que se llegó al límite de la amplitud estimada de 2 mm, lo cual concluimos que fue producido por las vibraciones horizontales que genera el pistón con el

cual trabaja el equipo. En la siguiente tabla presentamos las amplitudes calculadas para esta cimentación:

*Tabla 33 Resumen de Resonancias y Amplitudes calculadas para la Cimentación de la Mesa de Enfriamiento*

MODO	fm Frecuencia máquina $\omega$ (rad/s)	fo Frecuencia calculada $\omega_c$ (rad/s)	Revisión de resonancia fm/fo	Amplitud calculada mm	Amplitud permisible mm	Observaciones
Vertical Z	0.16	100.17	0.0016	0.84	2	cumple
Horizontal X	0.16	85.04	0.0018	2	2	cumple
Horizontal Y	0.16	88.52	0.0018	0.16	2	cumple
Giro alrededor Y	0.16	211.11	0.0007	-	-	-
Giro alrededor X	0.16	111.19	0.0014	-	-	-
Torsión	0.16	173.24	0.0009	-	-	-

**Fuente: Autor**



*Gráfico 7 Amplitud de la mesa de enfriamiento*

**Fuente: Autor**

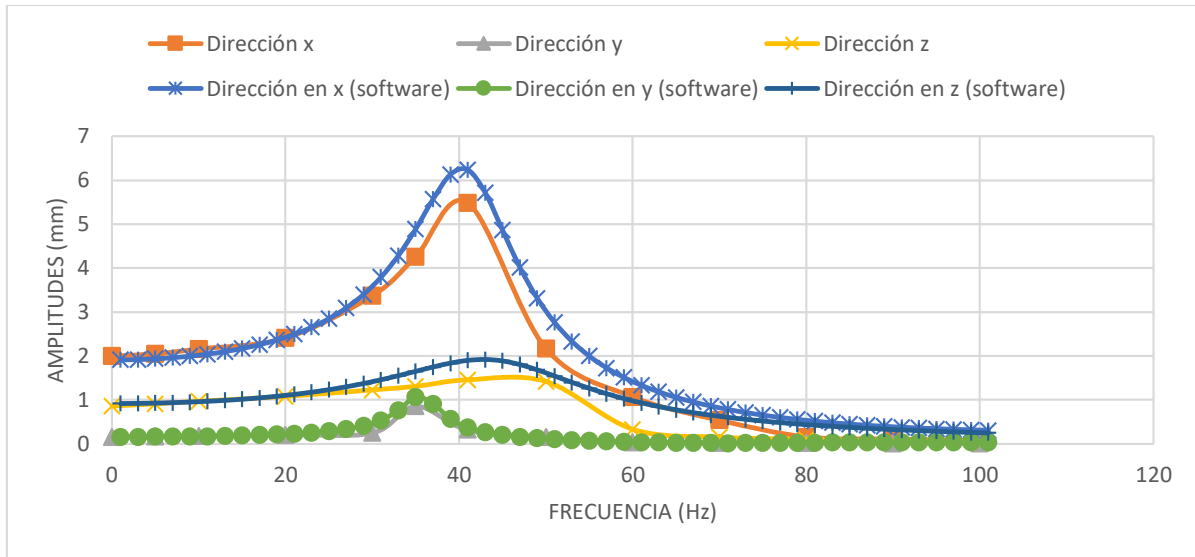


Gráfico 8 Comparación de Amplitud de la mesa de enfriamiento galopante entre Excel y Software

Fuente: Autor

Realizando una comparativa del gráfico 9, entre los resultados de los programas tanto en Excel como del software, notaremos que presentan una gran similitud en el rango de la baja frecuencia de 0.025 Hz para el caso de la cimentación de la mesa de enfriamiento en estudio; en Excel se muestra una amplitud de 2 mm en dirección x que es una de las más altas mientras que para el software se observa una amplitud de 1.9 mm para la frecuencia antes mencionada, lo cual representa una diferencia del 5%.

En la tabla se presenta una comparación entre amplitudes del sistema de Mesa de enfriamiento del programa comercial y el calculado manualmente:

Tabla 34 Resumen comparativo entre Amplitudes Calculadas para la Cimentación de la Mesa de Enfriamiento

MODO	fm Frecuencia máquina $\omega$ (rad/s)	fo Frecuencia calculada $\omega c$ (rad/s) (ver en anexos)	Revisión de resonancia fm/fo	Amplitud calculada mm (ver en anexos)	Amplitud de software mm	Amplitud permisible mm	Observaciones
Vertical Z	0.16	100.17	0.0016	0.86	0.86	2	cumple
Horizontal X	0.16	85.04	0.0018	2	2	2	cumple
Horizontal Y	0.16	88.52	0.0018	0.16	0.16	2	cumple
Giro alrededor Y	0.16	211.11	0.0007	-	-	-	-
Giro alrededor X	0.16	111.19	0.0014	-	-	-	-
Torsión	0.16	173.24	0.0009	-	-	-	-

Fuente: Autor

Se concluye también que en base a los resultados obtenidos en el programa SAFE de las cimentaciones tanto para el sistema de Carga en caliente como para la mesa de enfriamiento galopante, los asentamientos determinados no sobrepasaron el asentamiento estimado de 6 mm, lo cual nos indica que el diseño de las cimentaciones es apropiado y cumple con los lineamientos establecidos.

Además, en cuanto a las capacidades de carga admisibles de  $7.7 \text{ t/m}^2$  para el sistema de Carga en caliente y de  $4.96 \text{ t/m}^2$  para la mesa de enfriamiento, el programa presento capacidades de  $6.73 \text{ t/m}^2$  y de  $4.65 \text{ t/m}^2$  respectivamente lo que significa que las capacidades de carga obtenidas no superan a las admisibles garantizando el diseño de las cimentaciones.

## **7.2 RECOMENDACIONES**

- Cuando se requiera realizar un diseño de cimentaciones o estructuras que se encuentren en contacto con maquinaria industrial se recomienda que siempre se realice un análisis de la resonancia tanto del equipo como del sistema que lo conforma (Máquina-cimentación-suelo), ya que por motivos de las vibraciones que se producen la resonancia y las amplitudes producidas si se exceden de los parámetros establecidos podría causar serios daños a la estructura y disminuir la vida útil de la misma así como también del funcionamiento de la maquinaria.
- Se recomienda poseer un buen estudio del funcionamiento del equipo por parte del fabricante para por tener una adecuada información como las cargas y momentos que estaría generando la maquinaria a la base de la cimentación y de este modo poder obtener un diseño óptimo con las verdaderas cargas que se estaría aplicando.
- A demás se debe exigir un completo estudio de suelos tanto estáticos como dinámicos para una buena sustentación del medio en el cual se desea construir y poder estimar las diferentes posibilidades que tendría el ingeniero para asegurarse que la cimentación no presente asentamientos diferenciales demasiado grandes ya que este tipo de maquinaria utilizada en plantas industriales requieren una precisión de milímetros para que funcionen correctamente.

### 7.3 BIBLIOGRAFÍA

- ALDAMAS BARRERA, I. (2014). *DISEÑO DINÁMICO DE UNA CIMENTACIÓN PARA UN COMPRESOR RECIPROCANTE EN LA REFINERÍA "CEPSA-LA RABIDA" EN HUELVA, ESPAÑA (Tesis de Pregrado)*. CIUDAD UNIVERSITARIA.
- ANGOS TACO, M. A. (2009). *MANUAL DE DISEÑO DE CIMENTACIONES TIPO BLOQUE PARA EQUIPO DINÁMICO*. Sangolquí.
- BRAJA M. DAS, & G.V. RAMANA. (2011, 1993). *Principles of Soil Dynamics*. Stanford: Hilda Gowans.
- CHAGCHA GUERRERO, E. F., & VEGA RAZA, J. D. (2014). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CAMINO DE RODILLOS DE ENTRADA Y SALIDA DEL DESBASTE PARA EL TRANSPORTE DE PALANQUILLA EN EL TREN N°1 DE LA EMPRESA NOVACERO S.A PLANTA - LASSO (Tesis de Pregrado)*. Sangolqui.
- Dobry, R., & Gazetas, G. (1986). *Dynamic Response of Arbitrarily Shaped Machine*. NY: ASCE.
- Dobry, R., Gazetas, G., & Stokoe, K. (1985). *Dynamic Response of Arbitrarilly Shaped Foundations:Experimental Verification*. NY: Rensselaer Polytechnic Institute.
- Flores Gomez, I. E. (2012). *ANALISIS DINAMICO DE CIMENTACIONES PARQUE INDUSTRIAL-ICA*. Lima: Seccion de Posgrado.
- GARCÍA DELGADO, I. (2018). *ESTUDIO DE SUELOS - GALPÓN NOVACERO- LASSO-COTOPAXI*. QUITO: INGEOPAV.
- H. BOLTON SEED, & I. M. IDRIS. (1970). *SOIL MODULI AND DAMPING FACTORS FOR DYNAMIC RESPONSE ANALYSES*. California: SW. AJA.

- LIMAICO ÁLVAREZ, L. M. (2015). *ESTUDIO DINÁMICO Y ESTÁTICO DE CIMENTACIONES QUE SOPORTAN EQUIPO PETROLERO E INDUSTRIAL*. QUITO.
- McCORMAC, J., & BROWN, R. (2011). *Diseño de Concreto Reforzado*. New Jersey: Alfaomage .
- Montoya, J., & Pinto Vega, F. (2010). *CIMENTACIONES*. Mérida.
- SALAZAR CONTRERAS, J. C. (2013). *CÁLCULO Y DISEÑO DE CIMENTACIONES PARA EQUIPOS Y MAQUINARIA PRESENTES EN UNA FACILIDAD DE PRODUCCIÓN PETROLERA (Tesis de Pregrado)*. SANGOLQUÍ.
- Suresh C. Arya, Michael W. O'Neill, & George Pincus. (1984). *Design of Structures and Foundations for Vibrating Machines*. Houston, Texas: Gulf Publishing Company.
- VELAZQUEZ HERNÁNDEZ, A. (2006). *Análisis Estático y Dinámico de vigas de cimentación asentadas en suelo modelado como medio continuo tipo Winkler. (Tesis Doctoral)*. Mexico. D.F.

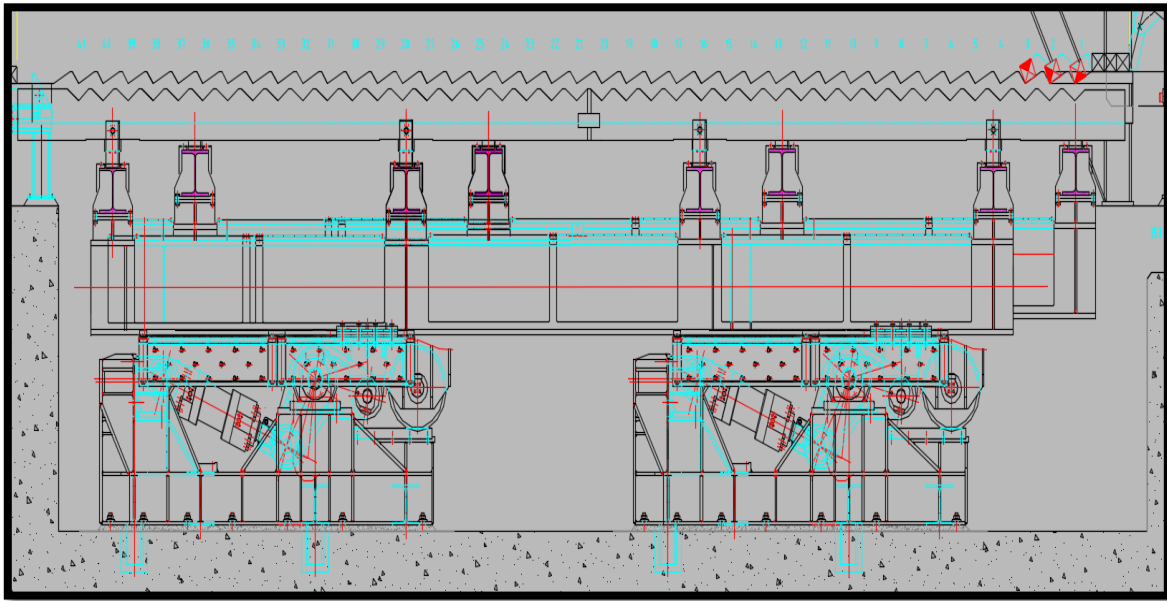


## 7.4 ANEXOS

### 7.4.1 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LA MAQUINARIA

#### 7.4.1.1 MESA DE ENFRIAMIENTO GALOPANTE

Cantidad: ..... Una (1)



*Figura 122 Mesa de Enfriamiento Galopante*

**Fuente: Empresa SIDERTECH S.A.**

#### - **Función:**

Recepción de las palanquillas cortadas del puente transferidor y cargarlas sobre los peines de forma automática.

Dar vuelta 90° a las palanquillas individualmente y continuamente para asegurar el enfriamiento uniforme y minimizar la deformación de las palanquillas debida al enfriamiento irregular de las caras.

Entregar las palanquillas enfriadas a la mesa de almacenamiento.

#### - **Construcción:**

Mesa de enfriamiento con giro continuo de la palanquilla, constituida por dos robustos bastidores en perfiles y columnas de acero soldado y maquinado, que consta de:

Ocho (8) juegos de peines independientes, moviéndose uno horizontalmente y el otro verticalmente.

Los peines se hacen de placas de acero pesadas con una forma especial para dar vuelta y adelantar respectivamente las palanquillas en proceso de enfriarse. Todo el conjunto es anclado directamente a la cimentación y el diseño permite minimizar los trabajos de fundación.

El movimiento del bastidor del juego de peines de subida y bajada (movimiento vertical) viene actuado mediante cuatro (4) cilindros hidráulicos sincronizados hidráulicamente.

El movimiento del bastidor del juego de peines que adelantan las palanquillas (movimiento horizontal) viene actuando mediante dos (2) cilindros hidráulicos sincronizados.

La mesa de enfriamiento de giro continuo (solera galopante) garantiza el transporte y el enfriamiento uniforme de las palanquillas, que se quedan perfectamente rectas, debido al diseño especial del perfil de los peines.

Completa con el sistema de lubricación por grasa.

El movimiento horizontal de los peines, empuja las palanquillas una a la vez sobre la mesa final de almacenamiento.

Tipo de la mesa de enfriamiento: ..... Giro continuo (solera galopante)

Dimensiones preliminares de la mesa: .....11 m x 13 m

Longitud de la mesa en la zona de giro de las palanquillas: .....11 200 mm

Número de muescas: ..... 41

Paso entre muescas: ..... aprox. 280 mm

Longitud máxima de la palanquilla: .....12 000 mm (una hilera)

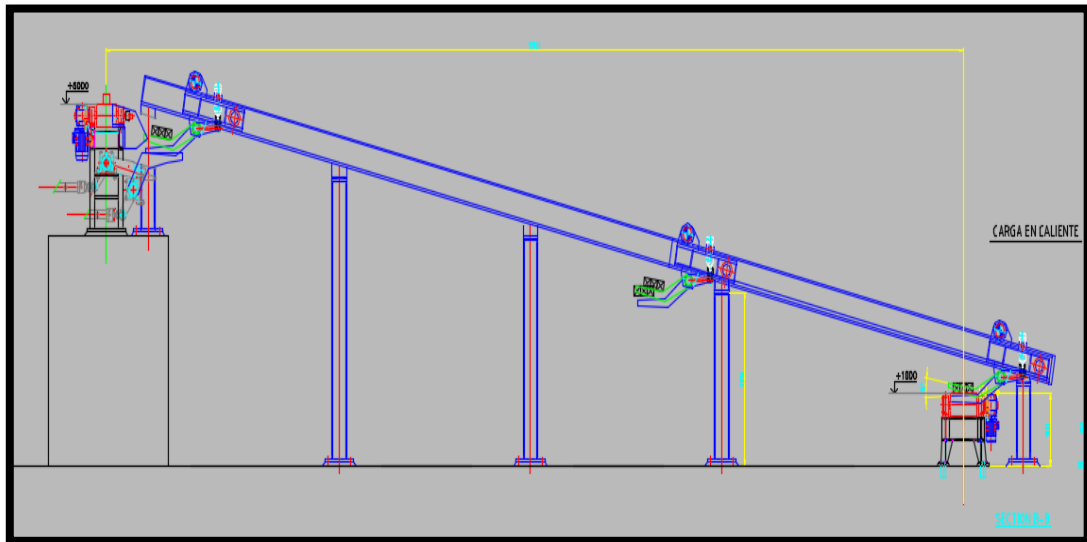
Longitud mínima de la palanquilla: .....6 000 mm (en dos hileras)

Temperatura de la palanquilla al final de la zona de giro: .....aprox. 450°C

Actuación: ..... por cilindros hidráulicos.

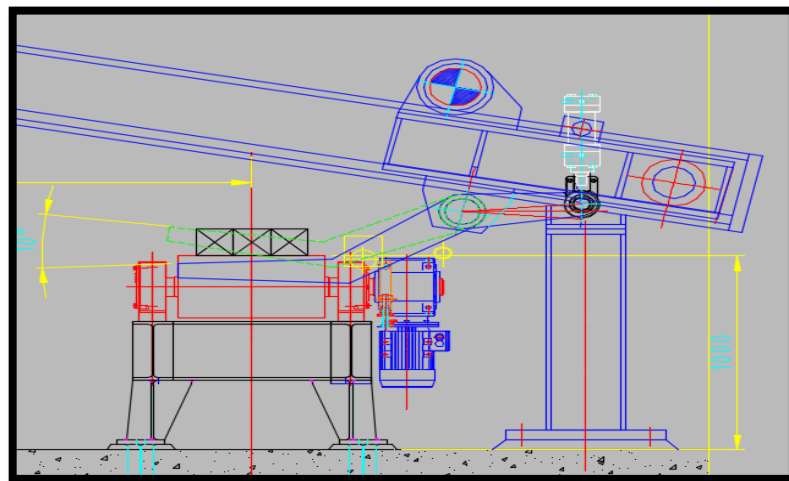
#### 7.4.1.2 *SISTEMA DE CARGA EN CALIENTE*

Cantidad..... 1 (uno)



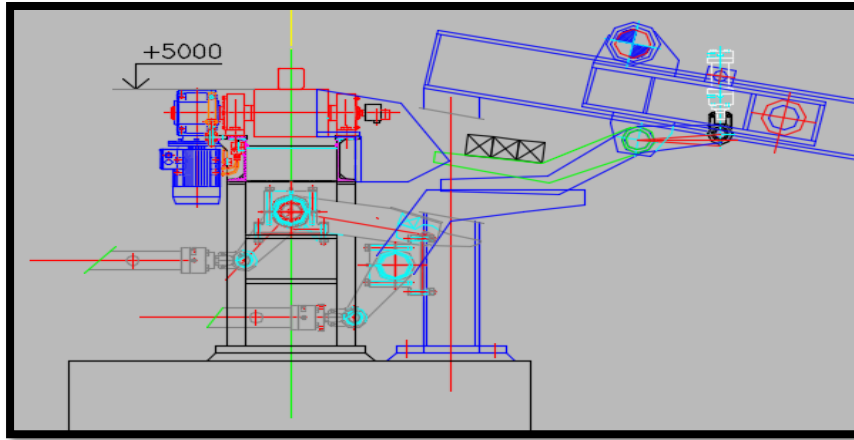
*Figura 123 Instalación General*

**Fuente: Empresa SIDERTECH S.A.**



*Figura 124 Detalle de concepto sistema de carga en caliente*

**Fuente: Empresa SIDERTECH S.A.**



*Figura 125 Detalle de concepto sistema carga desde puente de carga hasta el camino de rodillos hacia el horno*

**Fuente: Empresa SIDERTECH S.A.**

**- Función:**

Transferencia de las palanquillas a la porción inicial de la mesa de carga horno de recalentamiento.

**- Diseño:**

Puente Transferidor con palanca de elevación paquete de palanquillas de longitud hasta 12m que cruza entre el camino de rodillos y la mesa de carga horno recorriendo sobre dos (2) rieles, accionado mediante piñón y cremallera en cada extremo. Mecanismo del completo con el eje de transmisión y los cilindros hidráulicos que mandan las palancas de levantamiento permitiendo la cogida de las palanquillas arriba el camino de rodillos y el desplazo sobre la mesa horno.

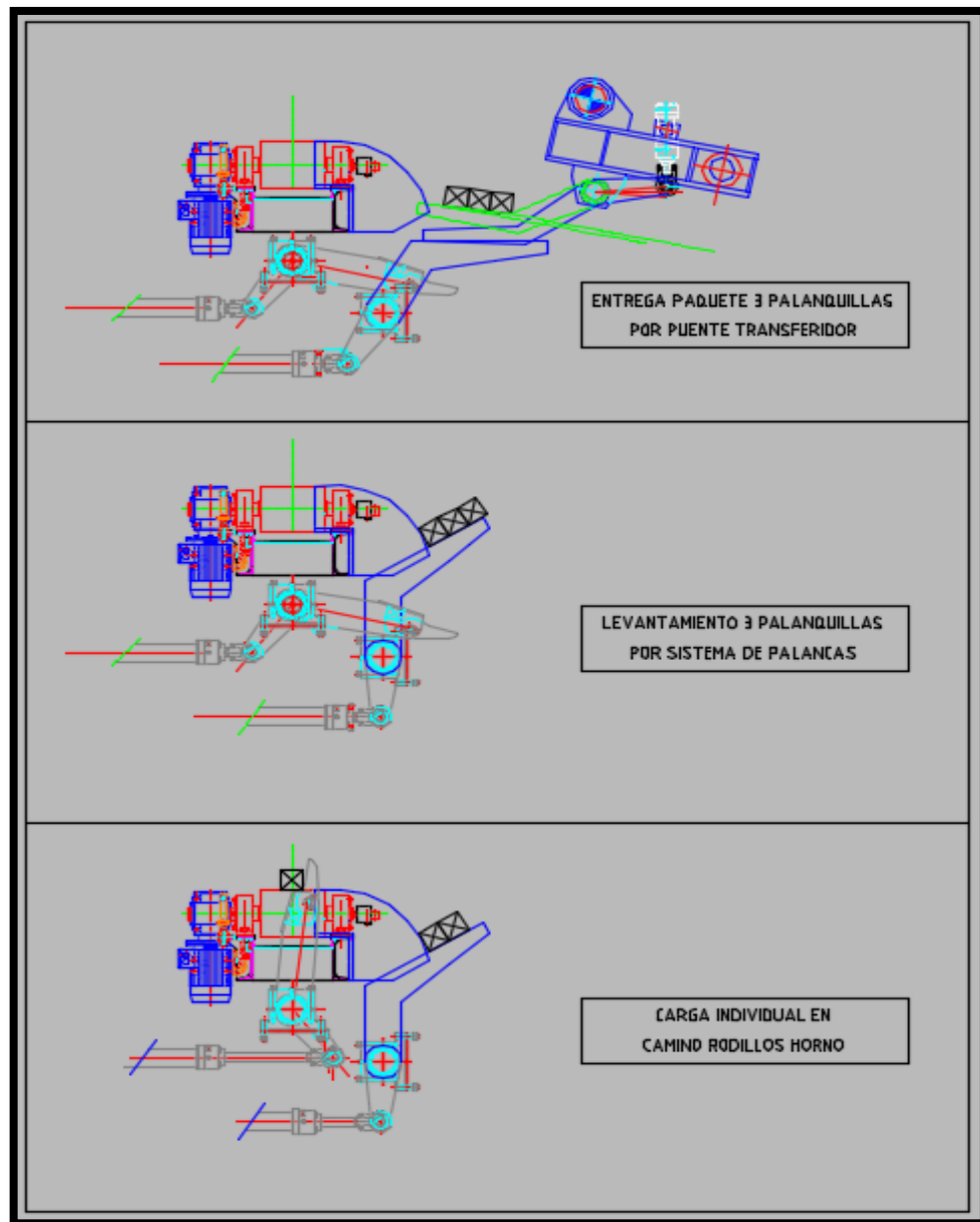
**- Construcción:**

Puente Transferidor que consiste en una robusta estructura en acero soldada y mecanizada equipada con el sistema motriz, dotada de ruedas y piñones montadas a los extremos de dos (2) robustas vigas transversales.

El puente está accionado por un (1) moto reductor 11 kW A.C. colocado centralmente y dos (2) ejes de transmisión. Funcionamiento automático y provisto también con el sistema manual de mando a distancia del cuarto de control.

Sistema de Palancas hidráulico-mecánico para conseguir el levantamiento de las palanquillas entregadas por el puente y luego permitir la carga individual de la palanquilla en el camino de rodillos de carga horno

El sistema trabaja según los conceptos indicados en el siguiente croquis:



*Figura 126 Sistema de funcionamiento en Horno*

**Fuente: Empresa SIDERTECH S.A.**

## 7.4.2 ANEXO DEL CÁLCULO DE DISEÑO DE LA METODOLOGÍA

### 7.4.2.1 PARA EL SISTEMA DE CARGA EN CALIENTE

Cálculo de los coeficientes de rigidez dinámica:

#### Rigidez Dinámica Vertical

$$A/(4L^2) = 0.182 \geq 0.02$$

$$\text{factor de rigidez} \quad S_z = 0.73 + 1.54(A/4L^2)^{0.7} \quad S_z \quad 1.159$$

$$\text{vertical}^5 =$$

O

$$A/(4L^2) = 0.182 < 0.02$$

$$S_z \quad 0.8$$

=

$$\text{rigidez estática} \quad K_z = S_z \frac{2LG}{1-\nu} \quad K_z \quad 18676 \quad \text{t/m}$$

$$= 4.0$$

Con el Valor de  $a_0$  y la figura 51:

$$k_z = \frac{\bar{K}_z}{K_z} = 0.99 \quad \bar{K}_z = k_z \cdot K_z = 18402 \quad \text{t/m}$$

6.8

Figura 127 Cálculo de Rigidez Dinámica Vertical para Cimentación de Carga en Caliente

Fuente: Autor

#### Rigidez Dinámica Horizontal, Lado corto (dirección Y)

$$A/(4L^2) = 0.182 \geq 0.16$$

$$S_y = 4.5(A/4L^2)^{0.38} = 2.35$$

$$A/(4L^2) = 0.182 < 0.16$$

$$S_y = 2.24$$

$$K_y = S_y \frac{2LG}{2 - \nu} \quad K_y = 156246.69 \quad \text{t/m}$$

Con el valor de  $a_0$  y la figura 52:

$$k_y = \frac{\bar{K}_y}{K_y} \quad \bar{K}_y = k_y \cdot K_y$$

$$= 0.89 \quad = 139112.48 \quad \text{t/m}$$

### Rigidez Dinámica Horizontal, Lado largo (dirección X)

$$K_x = K_y - \frac{0.21 \cdot LG}{0.75 - \nu} \left(1 - \frac{B}{L}\right)$$

Kx= 117574.17 t/m

$$\bar{K}_x = K_x = 117574.17 \text{ t/m}$$

Figura 128 Cálculo de Rigidez Dinámica Horizontal para Cimentación de Carga en Caliente

Fuente: Autor

### Rigidez Dinámica por cabeceo, lado corto Y (Alrededor del eje x)

$$B/L = 0.182 \geq 0.4$$

$$S_{rx} = 3.2$$

$$B/L = 0.182 < 0.4$$

$$S_{xz} = \frac{2.54}{\left(\frac{B}{L}\right)^{0.25}} \quad S_{rx} = 3.89$$

$$K_{rx} = S_{rx} \left( \frac{G}{1 - \nu} \right) (I_x)^{0.75} = 253977.23 \text{ t m/rad}$$

Con el valor de  $a_0$  y la figura 53a:

$$k_{rx} = \frac{\bar{K}_{rx}}{K_{rx}} = 1.01$$

$$\bar{K}_{rx} = k_{rx} \cdot K_{rx} = 256585.57 \text{ t m/rad}$$



**Rigidez Dinámica o cabeceo, lado largo (Alrededor del eje y)**

$$B/L = 0.182 \geq 0.2$$

$$S_{rx} = 3.2$$

$$B/L = 0.182 < 0.2$$

$$S_{rx} = \frac{2.54}{\left(\frac{B}{L}\right)^{0.25}} = 3.89$$

$$K_{ry} = S_{ry} \left( \frac{G}{1-\nu} \right) (I_y)^{0.75} = 3275961.74 \text{ t m/rad}$$

Con el valor de  $a_0$  y la figura 53b:

$$k_{rx} = \frac{\bar{K}_{rx}}{K_{rx}} = 1.00 \quad \bar{K}_{rx} = k_{rx} \cdot K_{rx} = 3287172.23 \text{ Ton m/rad}$$

Figura 129 Cálculo de Rigidez Dinámica por Cabeceo para Cimentación de Carga en Caliente

Fuente: Autor

**Rigidez Dinámica por torsión (Alrededor del eje z)**

$$B/L = 0.182 > 0.25$$

$$St = 3.8$$

$$B/L = 0.182 < 0.25$$

$$St = 3.80$$

$$2295564.7$$

$$K_t = StG(J)^{0.75} \quad K_t = 7 \text{ t. m}$$

Con el valor de  $a_0$  y la figura 54:

$$k_t = \frac{\bar{K}_t}{K_t} = 1.00 \quad \bar{K}_t = k_t \cdot K_t = 2303261.8 \text{ t. m/rad}$$

Figura 130 Cálculo de Rigidez Dinámica por Torsión para Cimentación de Carga en Caliente

Fuente: Autor

**Cálculo de Frecuencias naturales y amplitudes de vibración:**

Revisión Vertical

$$\omega_{nz} = \sqrt{\frac{C_u A}{m}}$$

$\omega_{nz} =$	<b>142.95</b>	<b>rad/s</b>
-----------------	---------------	--------------

$\omega / \omega_{nz} =$       0.007      < 0.8      ok

$$A_{zmax} = \frac{P_o}{m(\omega_{nz}^2 - \omega^2)}$$

Azmax=      0.00027      m

<b>Azmax=</b>	<b>0.27</b>	<b>m</b>
---------------	-------------	----------

$$\omega_{nx} = \sqrt{\frac{K_x}{m}} = \sqrt{\frac{C_{rx} A}{m}}$$

Revisión Horizontal dirección x , y

$\omega_{nx} =$	<b>114.26</b>	<b>rad/s</b>
$\omega_{ny} =$	<b>124.29</b>	<b>rad/s</b>

$\omega / \omega_{nx} =$       0.0092      < 0.8      ok

$\omega / \omega_{ny} =$       0.0084

Amplitud permisible  
para máquinas y  
cimentaciones de  
máquinas de la fig. 43

Ax=      0.0002      m

<b>A<sub>x</sub>=</b>	<b>0.21</b>	<b>mm</b>
<b>A<sub>y</sub>=</b>	<b>0.07</b>	<b>mm</b>

< 2 mm

REVISIÓN POR CABECEO ALREDEDOR DEL EJE Y , X

<b><math>\omega_{n\theta x}</math>=</b>	<b>156.78</b>	<b>rad/s</b>
<b><math>\omega_{n\theta y}</math>=</b>	<b>43.79</b>	<b>rad/s</b>

**$\omega$ = 1.05 rad/s**

Revisión de Resonancia

$\omega/\omega_{n\theta x}$ = 0.0067 < 0.8 ok

$\omega/\omega_{n\theta y}$ = 0.0239

<b>A<sub>θx</sub>=</b>	<b>0.0000</b>	<b>rad</b>
<b>A<sub>θy</sub>=</b>	<b>1.0e-5</b>	<b>rad</b>

REVISIÓN DE TORSIÓN POR EL EJE Z

$$f_{n\psi} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{C_{\psi} J_z}{M_{mz}}}$$

**f<sub>nΨ</sub>= 37.39 Hz**

<b><math>\omega_{ny}</math>=</b>	<b>234.90</b>	<b>rad/s</b>
----------------------------------	---------------	--------------

$\omega/$  0.0045

**$\omega_{ny}$ =**

El máximo desplazamiento angular por torsión

$$\psi_{nz} = \frac{M_z}{M_{mz}(\omega_{n\psi}^2 - \omega^2)} = 0 \quad \text{rad}$$

Figura 131 Cálculo de Frecuencias Naturales de la Cimentación de Carga en Caliente.

Fuente: Autor

#### 7.4.2.2 PARA LA MESA DE ENFRIAMIENTO GALOPANTE

Cálculo de los coeficientes de rigidez dinámica:

<b>Rigidez Dinámica Vertical</b>				1
	$A/(4L^2)=$	0.424	$\geq$	0.02
factor de rigidez	$S_z=0.73+1.54(A/4L^2)^{0.75}$	$S_z=$	1.539	
vertical	O			
	$A/(4L^2)=$	0.424	$<$	0.02
		$S_z=$	0.8	
rigidez estática	$K_z = S_z \frac{2LG}{1-\nu}$	$K_z=$	39906.8	t/m
Con el Valor de $a_0$ y la figura 51:				
	$k_z = \frac{\bar{K}_z}{K_z}$	$=$	1.02	
	$\bar{K}_z = k_z \cdot K_z$	$=$	40591.4	t/m

Figura 132 Cálculo de Rigidez Dinámica Vertical para Cimentación de la Mesa de Enfriamiento

Fuente: Autor

### Rigidez Dinámica Horizontal, Lado corto (dirección Y)

$$A/(4L^2) = 0.424 \geq 0.16$$

$$S_y = 4.5(A/4L^2)^{0.38} = 3.25$$

$$A/(4L^2) = 0.424 < 0.16$$

$$S_y = 2.24$$

$$K_y = S_y \frac{2LG}{2 - \nu} \quad K_y = 34675.49 \quad \text{t/m}$$

Con el Valor de  $a_0$  y la figura 52:

$$k_y = \frac{\bar{K}_y}{K_y} \quad \bar{K}_y = k_y \cdot K_y$$
$$= 0.91 \quad = 31700.53 \quad \text{t/m}$$

### Rigidez Dinámica Horizontal, Lado largo (dirección X)

$$K_x = K_y - \frac{0.21 \cdot LG}{0.75 - \nu} \left( 1 - \frac{B}{L} \right) \quad K_x = 29259.52 \quad \text{t/m}$$

$$\bar{K}_x = K_x = 29259.52 \quad \text{t/m}$$

Figura 133 Cálculo de Rigidez Dinámica Horizontal para Cimentación de la Mesa de Enfriamiento

Fuente: Autor

### Rigidez Dinámica o cabeceo, lado corto Y (Alrededor del eje x)

$$B/L = 0.424 \geq 0.4$$

$$S_{rx} = 3.2$$

$$B/L = 0.424 < 0.4$$

$$S_{xz} = \frac{2.54}{\left(\frac{B}{L}\right)^{0.25}} \quad S_{rx} = 3.15$$

$$K_{rx} = S_{rx} \left( \frac{G}{1-\nu} \right) (I_x)^{0.75} = 5841.52 \quad \text{t. m/rad}$$

Con el Valor de  $a_0$  y la figura 53a:

$$k_{rx} = \frac{\bar{K}_{rx}}{K_{rx}} = 1.01$$

$$\bar{K}_{rx} = k_{rx} \cdot K_{rx} = 5903.34 \quad \text{Ton m/rad}$$

### Rigidez Dinámica o cabeceo, lado largo (Alrededor del eje y)

$$B/L = 0.424 \geq 0.2$$

$$S_{rx} = 3.2$$

$$B/L = 0.424 < 0.2$$

$$S_{rx} = \frac{2.54}{\left(\frac{B}{L}\right)^{0.25}} = 3.15$$

$$K_{ry} = S_{ry} \left( \frac{G}{1-\nu} \right) (I_y)^{0.75} = 21178.45 \text{ t. m/rad}$$

Con el Valor de  $a_0$  y la figura 53b:

$$k_{rx} = \frac{\bar{K}_{rx}}{K_{rx}} = 1.00$$

$$\bar{K}_{rx} = k_{rx} \cdot K_{rx} = 21250.49 \text{ t. m/rad}$$

### Rigidez Dinámica por torsión (Alrededor del eje z)

$$B/L = 0.424 \geq 0.25$$

$$S_t = 3.8 + 10.7 \left( 1 - \frac{B}{L} \right)^{10} = 3.8$$

$$B/L = 0.424 < 0.25$$

$$S_t = 3.80$$

$$K_t = S_t G (J)^{0.75} = 20152.24 \text{ t. m}$$

Con el Valor de  $a_0$  y la figura 54:

$$k_t = \frac{\bar{K}_t}{K_t} = 1.00 \quad \bar{K}_t = k_t \cdot K_t = 20233.59 \text{ t. m/rad}$$

Figura 134 Cálculo de Rigidez Dinámica por Cabeceo y Torsión para Cimentación de la Mesa de Enfriamiento

Fuente: Autor

### Cálculo de Frecuencias naturales y amplitudes de vibración:

Revisión Vertical

$$\omega_{nz} = \sqrt{\frac{C_u A}{m}}$$

$\omega_{nz}=$

100.17

rad/s

$\omega/$

$\omega_{nz}=$

0.002

< 0.8

ok

$$A_{zmax} = \frac{P_o}{m(\omega_{nz}^2 - \omega^2)}$$

Azmax=

0.00086

m

Azmax=

0.86

mm

Revisión Horizontal dirección x , y

$$\omega_{nx} = \sqrt{\frac{K_x}{m}} = \sqrt{\frac{C_{rx} A}{m}}$$

$\omega_{nx}=$

85.04

rad/s

$\omega_{ny}=$

88.52

rad/s

$\omega/$

$\omega_{nx}=$

0.0018

< 0.8

ok

$\omega/$

$\omega_{ny}=$

0.0018

Ax=

0.002

m

Ax=

2

mm

Ay=

1.58E-04

m

Amplitud permisible para máquinas y cimentaciones de máquinas de la fig. 43

<=

2

mm



# REVISIÓN POR CABECEO ALREDEDOR DEL EJE Y , X

$\omega_{n\phi x}=$	<b>211.11</b>	<b>rad/s</b>
$\omega_{n\phi y}=$	<b>111.19</b>	<b>rad/s</b>

$$\omega = \mathbf{0.16 \quad rad/s}$$

Revisión de Resonancia

$$\omega / \omega_{n\phi x} = 0.0007 < 0.8 \quad \text{ok}$$

$$\omega / \omega_{n\phi y} = 0.0014$$

$A_{\phi x}=$	<b>0</b>	<b>rad</b>
$A_{\phi y}=$	<b>0</b>	<b>rad</b>

# REVISIÓN DE TORSIÓN POR EL EJE Z

$$f_{n\psi} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{C_{\psi} J_z}{M_{mz}}}$$

$$f_{n\psi} = 27.57 \quad \text{Hz}$$

$\omega_{n\psi}=$	<b>173.24</b>	<b>rad/s</b>
-------------------	---------------	--------------

$$\omega / \omega_{n\psi} = 0.00091$$

El máximo desplazamiento angular por torsión:

$$\psi_{nz} = \frac{M_z}{M_{mz} (\omega_{n\psi}^2 - \omega^2)} = 0 \quad \text{rad}$$

Figura 135 Cálculo de Frecuencias Naturales de la Cimentación de la Mesa de Enfriamiento.

Fuente: Autor

### 7.4.3 INFORME DEL ESTUDIO DE SUELOS PRESENTADO A LA EMPRESA

#### 7.4.3.1 REGISTRO FOTOGRAFICO DE TOMA DE MUESTRAS

##### PERFORACIÓN PGN2-1



Inicio de la Perforación PGN2-1



Fin de la Perforación PGN2-1



Muestra M1 de PGN2-1



Muestra M2 de PGN2-1



Muestra M3 de PGN2-1



Muestra M4 de PGN2-1



Muestra M5 de PGN2-1



Muestra M6 de PGN2-1

### PERFORACIÓN PGN2-2



Inicio de la Perforación PGN2-2



Fin de la Perforación PGN2-2



Muestra M1 de PGN2-2



Muestra M2 de PGN2-2



Muestra M3 de PGN2-2



Muestra M4 de PGN2-2



Muestra M5 de PGN2-2



Muestra M6 de PGN2-2

### PERFORACIÓN PGN2-3



Inicio de la Perforación PGN2-3



Fin de la Perforación PGN2-3





Muestra M1 de PGN2-3



Muestra M2 de PGN2-3



Muestra M3 de PGN2-3



Muestra M4 de PGN2-3

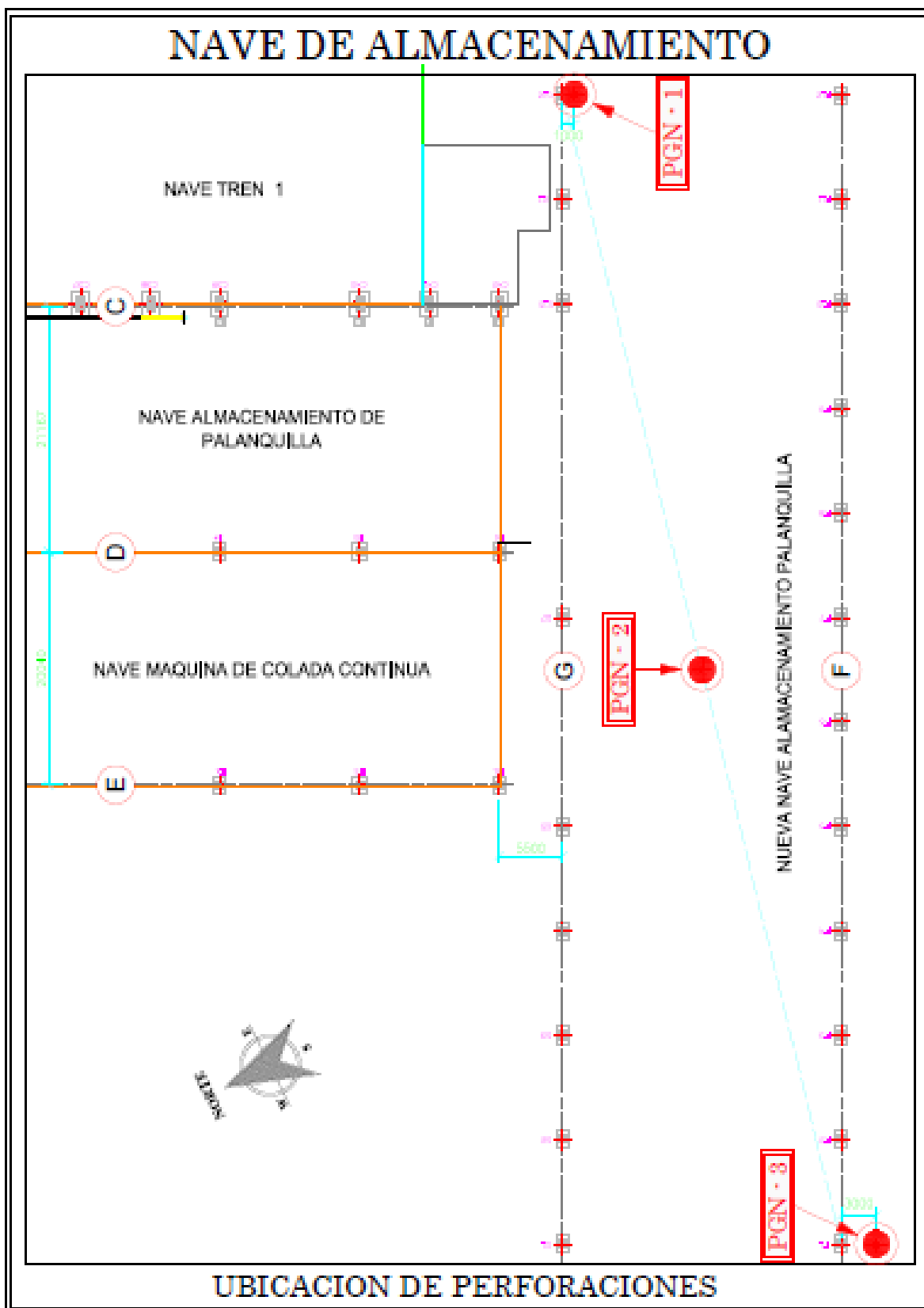


Muestra M5 de PGN2-3



Muestra M6 de PGN2-3

#### 7.4.3.2 UBICACIÓN DE PERFORACIONES



### **7.4.3.3 *REGISTROS DE PERFORACIONES***

# PERFORACIÓN PGN2-1

COTAS (mm)	PROFUNDIDAD	% RECUPERACIÓN	ESTRATIGRAFÍA	DESCRIPCIÓN DE SUELOS	PENETRACIÓN ESTANDAR						MUESTRA N°	PROPIEDADES FÍSICAS								LÍMITE LÍQUIDO LÍMITE PLÁSTICO HUMEDAD NATURAL					SUCS	PROPIEDADES MECÁNICAS																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
					N <sub>SPT</sub>	0	20	40	60	80		100	PORCENTAJE PASA TAMIZ				LÍMITES DE CONSISTENCIA (%)				0	20	40	60		80	100	Y' (Ton)	q <sub>u</sub> (Ton)	c (Ton)	φ																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
													4	10	40	200	LL	LP	Wh	Ip																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
	0.00																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								

PROYECTO: NAVE DE ALMACENAMIENTO  
 SECTOR: NOVACERO - LASSO  
 PERFORACIÓN: PGN2-1  
 FECHA: INICIO: 17/02/2018  
 FIN: 17/02/2018  
 COORDENADAS: N: m.  
 E: m.  
 INSPECTOR: ING. SILVIA GARCÍA D.

EQUIPO  
 REVESTIMIENTO NW  
 BROCA NQ  
 BARRIL NQ  
SIMBOLOGÍA  
 NIVEL  
 FREÁTICO

ENSAYO SPT	
S. GRANULARES N. DENSIDAD	S. COHESIVOS N. CONSISTENCIA
0 - 10 SUELTA	0 - 4 MUY BLANDA
10 - 30 MED. DENSA	4 - 8 BLANDA
30 - 50 DENSA	8 - 16 MEDIA
> 50 MUY DENSA	16 - 30 DURA
	> 30 MUY DURA

Ing. Silvia García Delgado  
 SENESCYT: 1005-11-1005452



# PERFORACIÓN PGN2-2

COTAS (msnm)	PROFUNDIDAD	% RECUPERACIÓN	ESTRATIGRAFÍA	DESCRIPCIÓN DE SUELOS	PENETRACIÓN ESTNDAR					MUESTRA N°	PROPIEDADES FÍSICAS								LÍMITE LÍQUIDO LÍMITE PLÁSTICO HUMEDAD NATURAL				▲ □ ●	SUCS	PROPIEDADES MECÁNICAS																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
					N <sub>spt</sub>	0	20	40	60		80	100	PORCENTAJE PARA TAMIZ				LÍMITES DE CONSISTENCIA (%)				0	20			40	60	80	100	Y' (Tonf)	qu (Tonf)	c (Tonf)	φ (°)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
													4	10	40	200	LL	LP	Wh	Ip																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
	0.00																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	

PROYECTO: NAVE DE ALMACENAMIENTO  
 SECTOR: NOVACERO - LASRO  
 PERFORACIÓN: PGN2-2  
 FECHA: INICIO: 17/02/2018  
 FIN: 17/02/2018  
 COORDENADAS: N: m.  
 E: m.  
 INSPECTOR: ING. SILVIA GARCÍA D.

EQUIPO  
 REVESTIMIENTO NW  
 BROCA NQ  
 BARRIL NQ  
SIMBOLOGÍA  
 NIVEL  
 FREÁTICO

ENSAYO SPT			
S. GRANULARES N. DENSIDAD		S. COHESIVOS N. CONSISTENCIA	
0 - 10	SUELTA	0 - 4	MUY BLANDA
10 - 30	MED. DENSA	4 - 8	BLANDA
30 - 50	DENSA	8 - 15	MEDIA
> 50	MUY DENSA	15 - 30	DURA
		> 30	MUY DURA

Ing. Silvia García Delgado  
 SENESECYT: 1005-11-1065452

## PERFORACIÓN PGN2-3

[illegible]

<b>PROYECTO:</b>	<b>NAVE DE ALMACENAMIENTO</b>	
<b>SECTOR:</b>	<b>NOVACERO - LASSO</b>	
<b>PERFORACIÓN:</b>	<b>PGN-3</b>	
<b>FECHA:</b>	<b>INICIO:</b>	<b>17/02/2018</b>
	<b>FIN:</b>	<b>17/02/2018</b>
<b>COORDENADAS:</b>	<b>N:</b>	<b>m.</b>
	<b>E:</b>	<b>m.</b>
<b>INSPECTOR:</b>	<b>ING. SILVIA GARCÍA D.</b>	

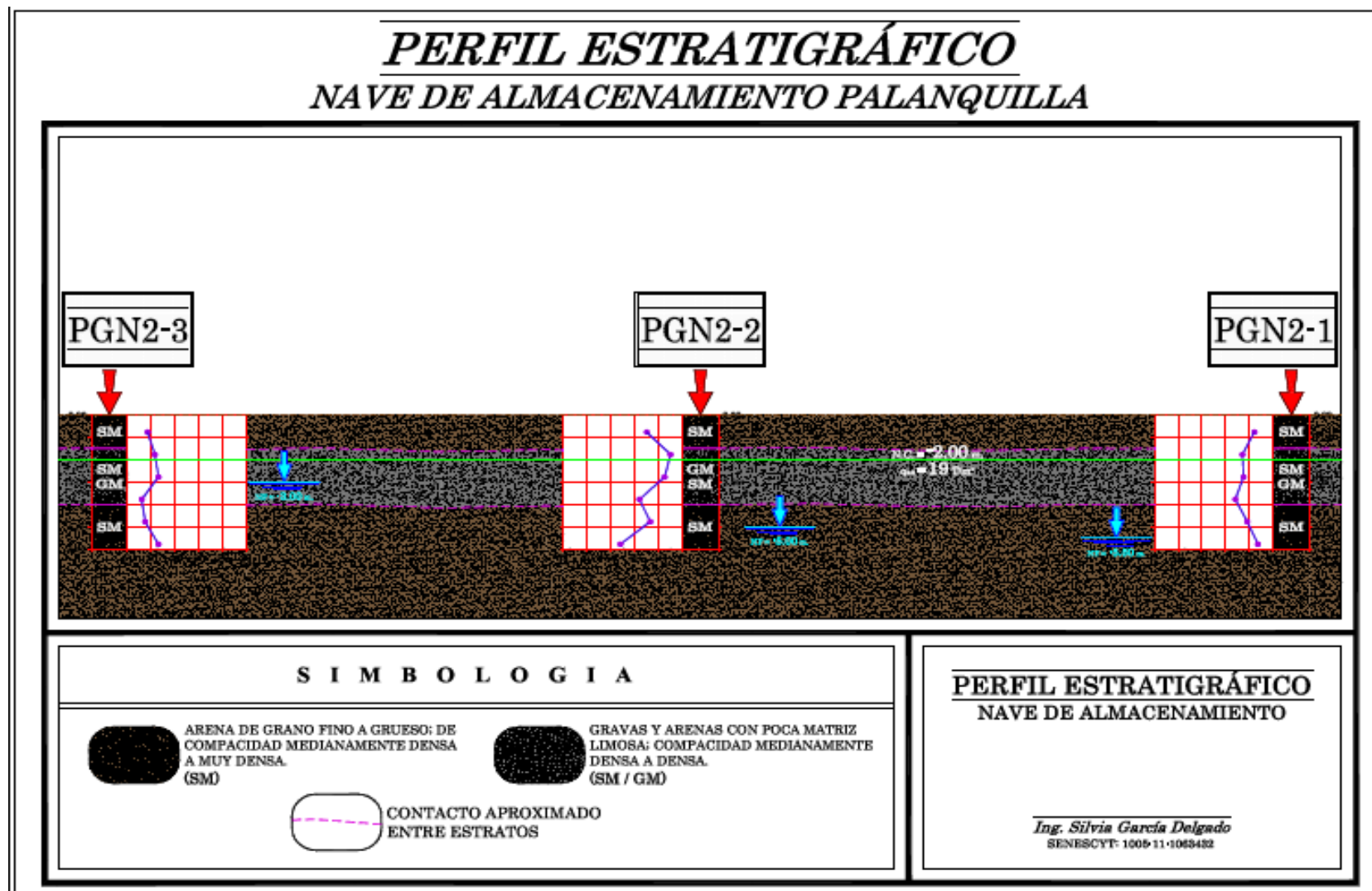
**EQUIPO**  
 REVESTIMIENTO NW  
 BROCA NQ  
 BARRIL NQ

**SIMBOLOGÍA**  
 NIVEL  
 FREÁTICO

<b>ENSAYO SPT</b>	
<b>S. GRANULARES</b> <b>N. DENSIDAD</b>	<b>S. COHESIVOS</b> <b>N. CONSISTENCIA</b>
0 - 10 SUELTA	0 - 4 MUY BLANDA
10 - 30 MED. DENSA	4 - 8 BLANDA
30 - 50 DENSA	8 - 15 MEDIA
> 50 MUY DENSA	15 - 30 DURA
	> 30 MUY DURA

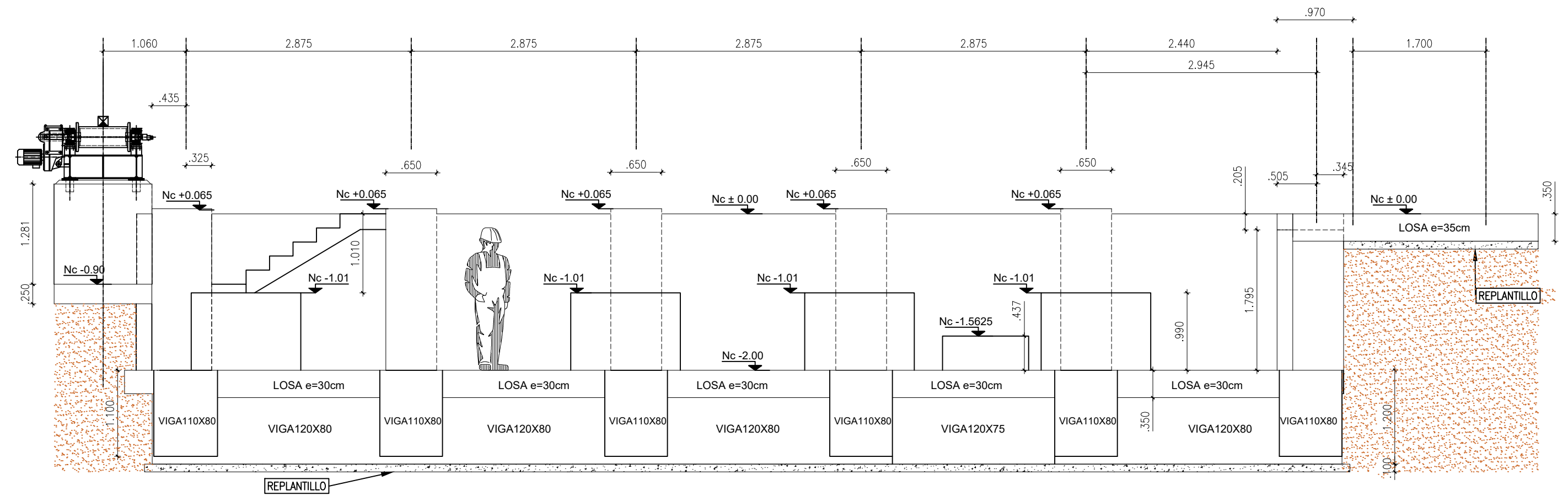
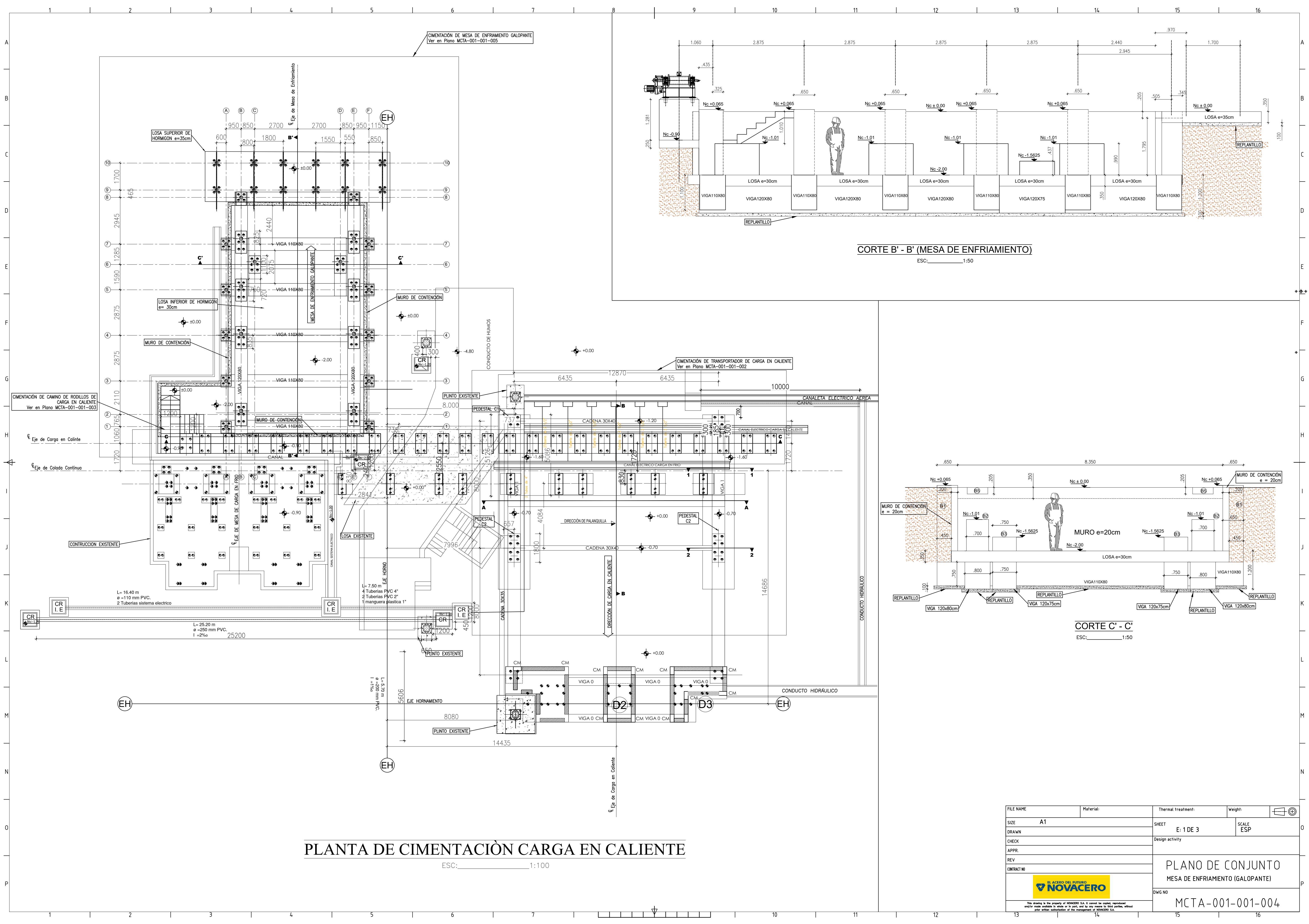
Ing. Silvia García Delgado  
GENESCYT: 1005-11-1065452

7.4.3.4 *PERFIL ESTRATIGRAFICO*

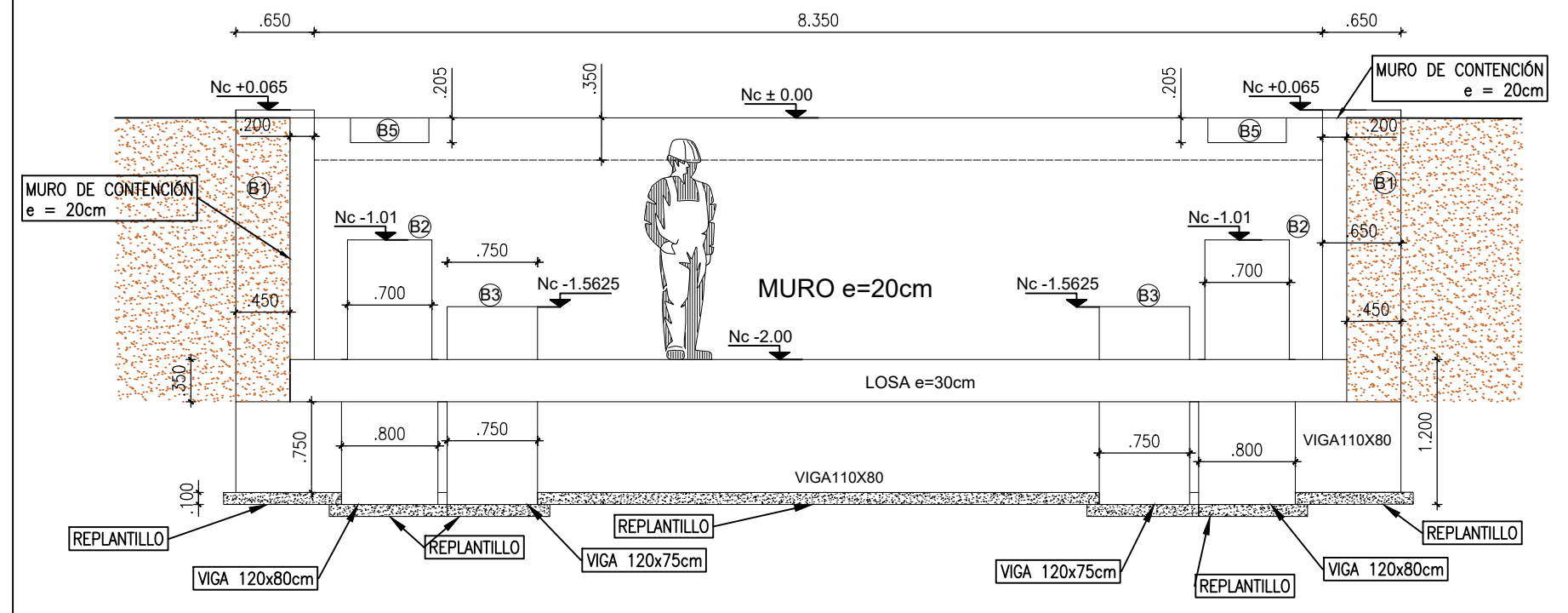


# **7.4.3.5 PLANOS ESTRUCTURALES**





CORTE B' - B' (MESA DE ENFRIAMIENTO)  
ESC: 1:50



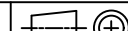

CORTE C' - C'  
ESC: 1:50

# PLANTA DE CIMENTACIÓN CARGA EN CALIENTE

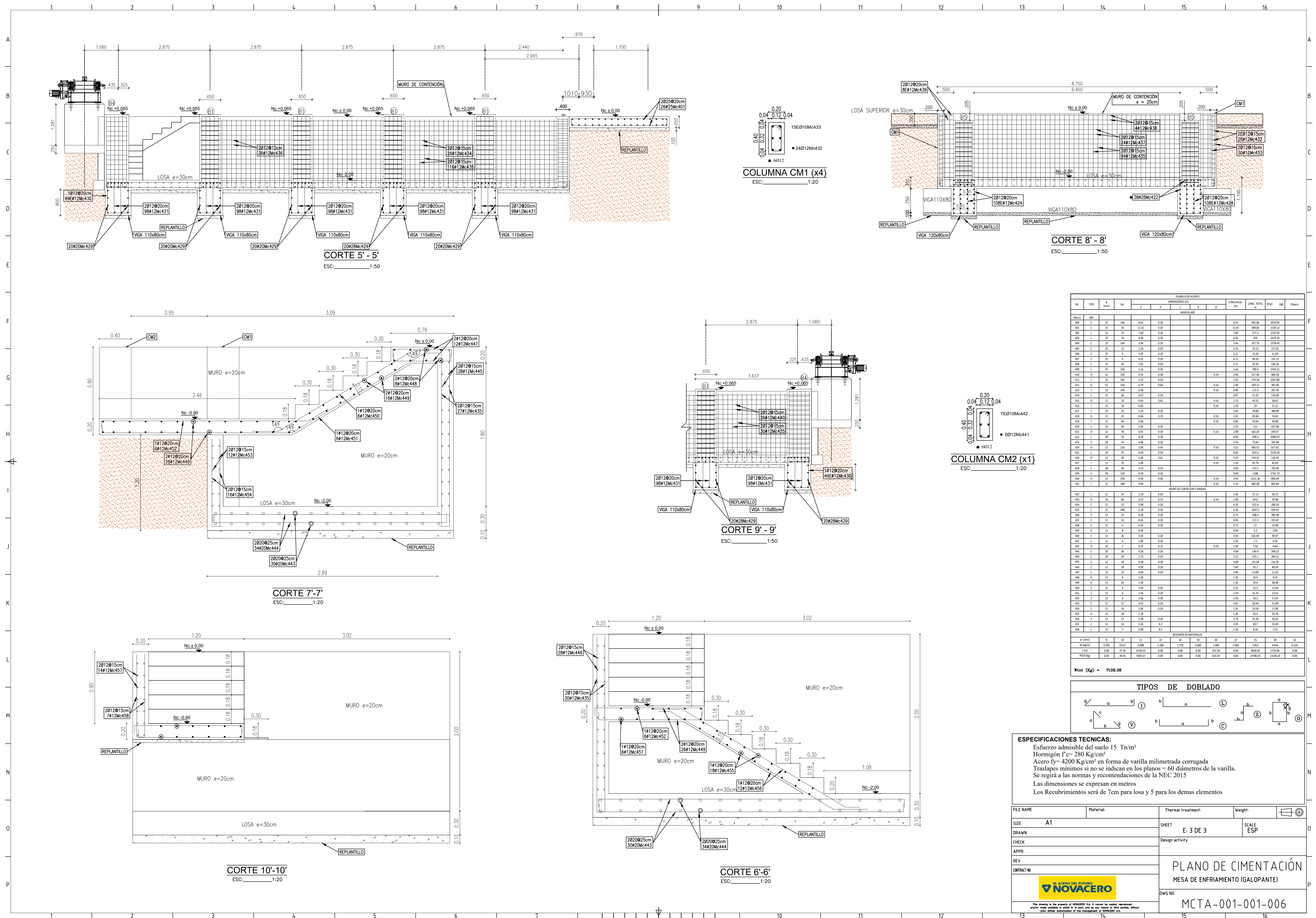
ESC: 1:100

FILE NAME	Material:	Thermal treatment:	Weight:	
SIZE	A1	SHEET	E: 1 DE 3	SCALE
DRAWN				ESP
CHECK		Design activity		
APPR.				
REV				
CONTRACT NO				
EL ACERO DEL FUTURO NOVACERO		PLANO DE CONJUNTO MESA DE ENFRIAMIENTO (GALOPANTE)		
This drawing is the property of NOVACERO S.A. It cannot be copied, reproduced or for resale without the prior written authorization of the management of NOVACERO S.A.		DWG NO MCTA-001-001-004		

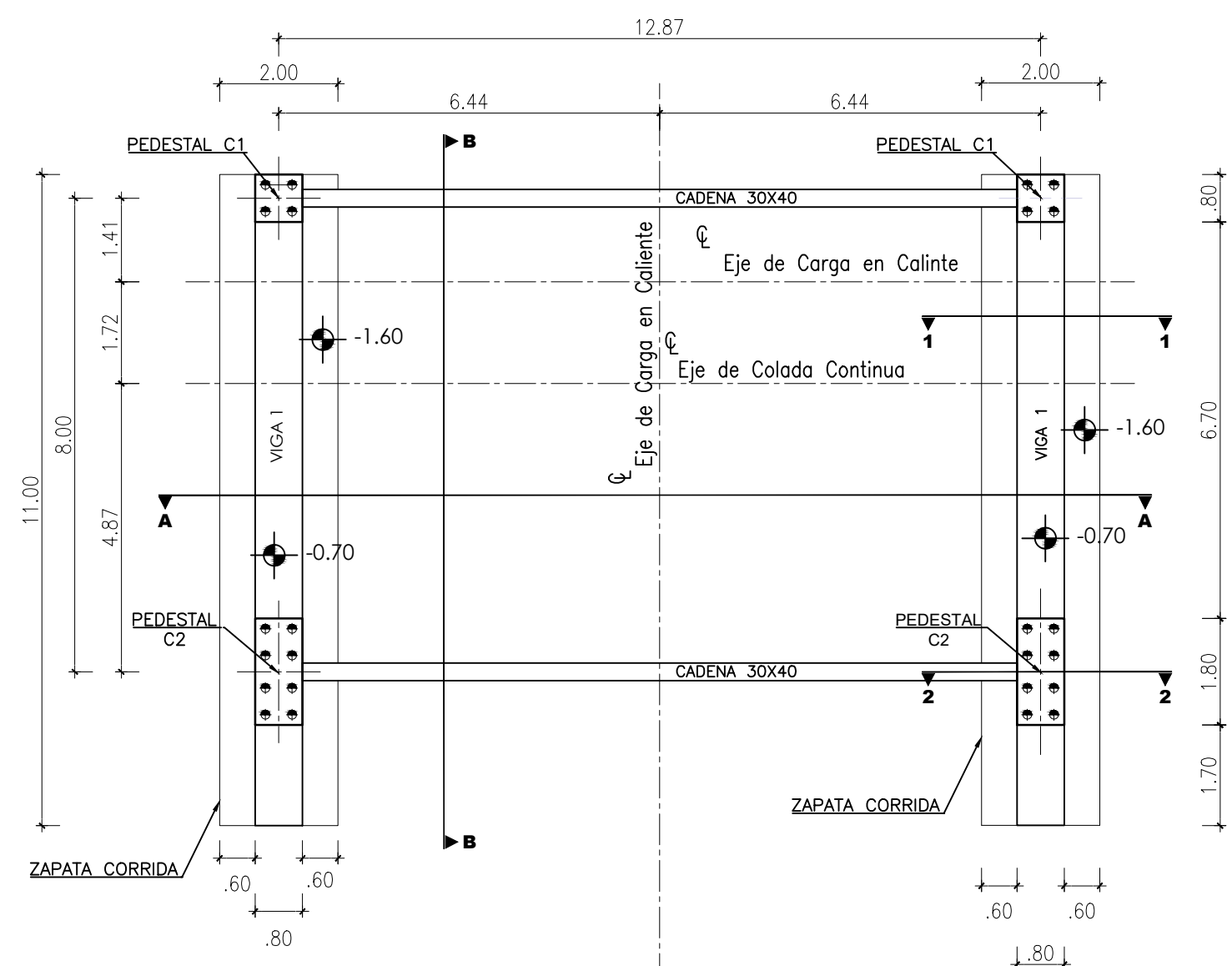


FILE NAME	Material:	Thermal Treatment:	Weight:	
SIZE	A1	SHEET	E: 2 DE 3	SCALE
DRAWN		ESP		
CHECK		Design activity		
APPR.		<div>PLANO DE CIMENTACIÓN</div> <div>MESA DE ENFRIAMIENTO (GALOPANTE)</div>		
REV				
CONTRACT NO				
		DWG NO	<div>MCTA-001-001-005</div>	
<small>This drawing is the property of NOVACERO S.A. It cannot be copied, reproduced, or further made available in whole or in part, and for any reason to third parties, without</small>				

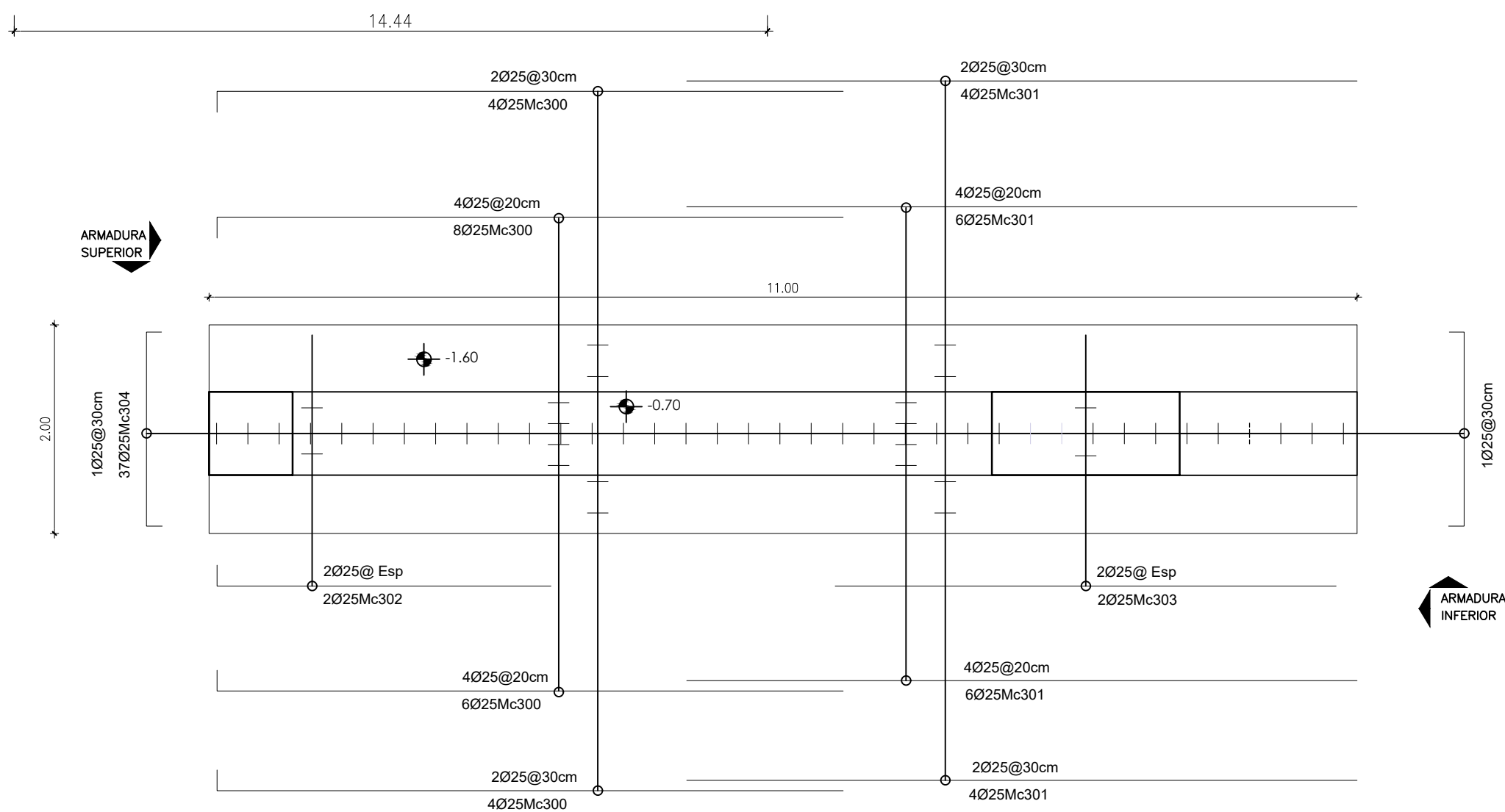




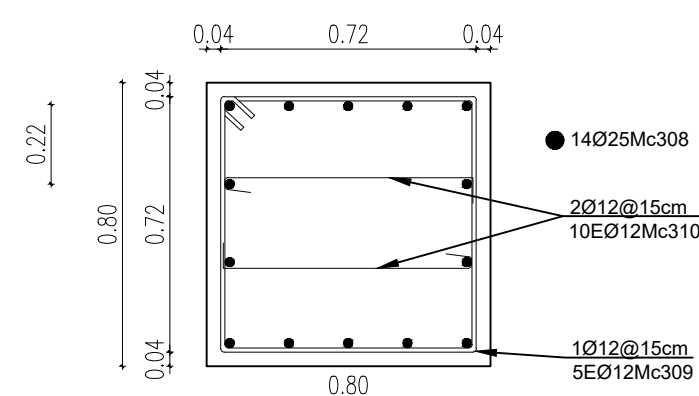




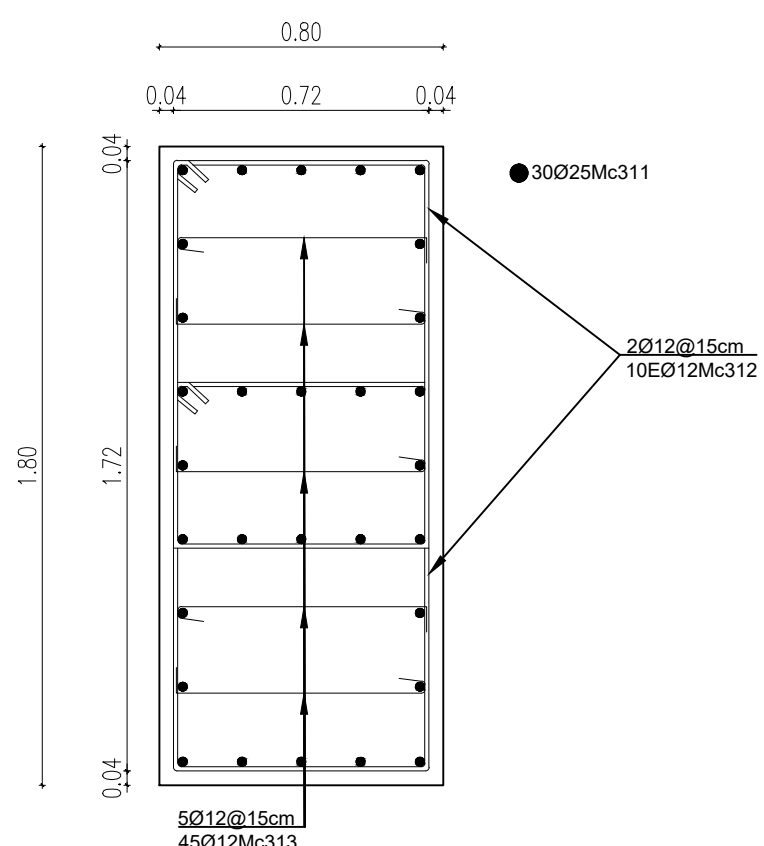
CIMENTACIÓN DE TRANSPORTADOR  
DE CARGA EN CALIENTE  
ESC: 1:100



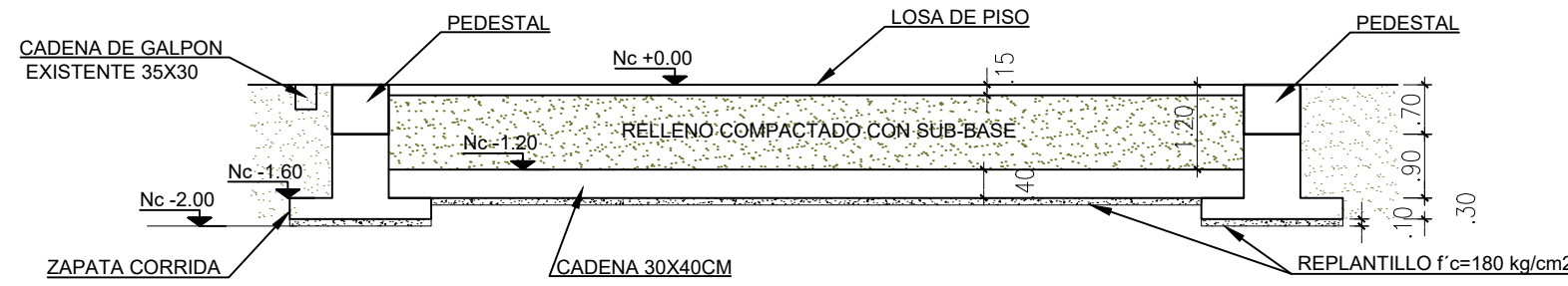
ARMADO DE ZAPATA CORRIDA  
(x2)  
ESC: 1:50



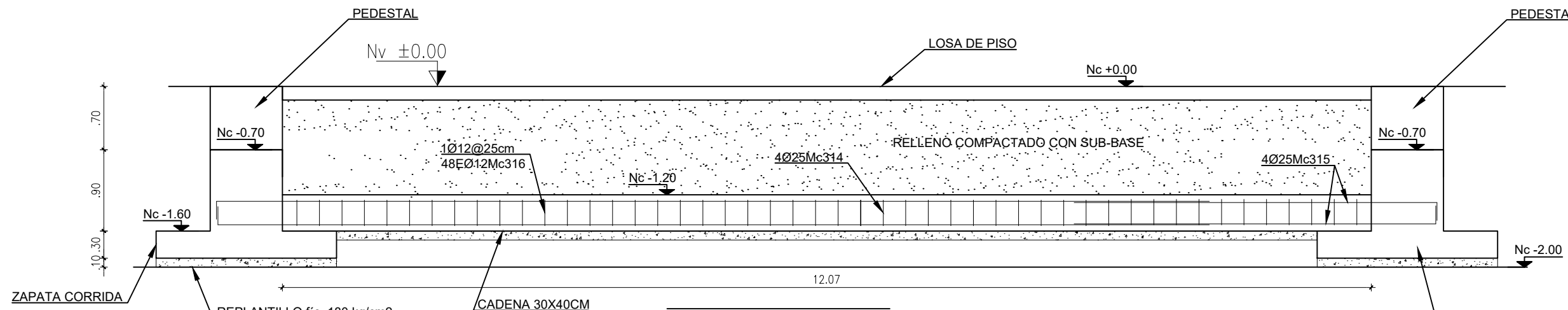
ARMADO PEDESTAL  
C1(x2)  
ESC: 1:20



ARMADO PEDESTAL  
C2(x2)  
ESC: 1:20

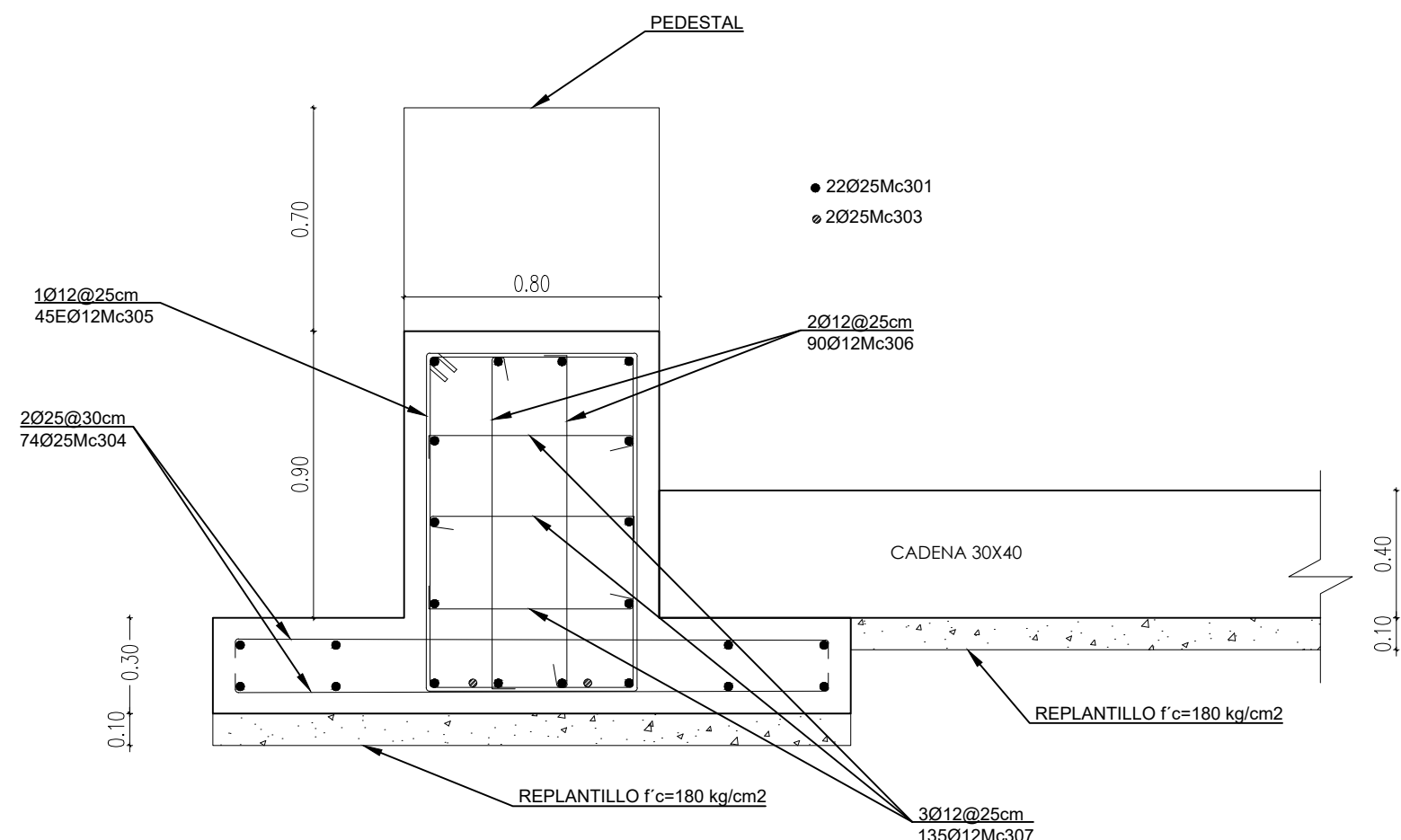


CORTE A-A  
ESC: 1:100

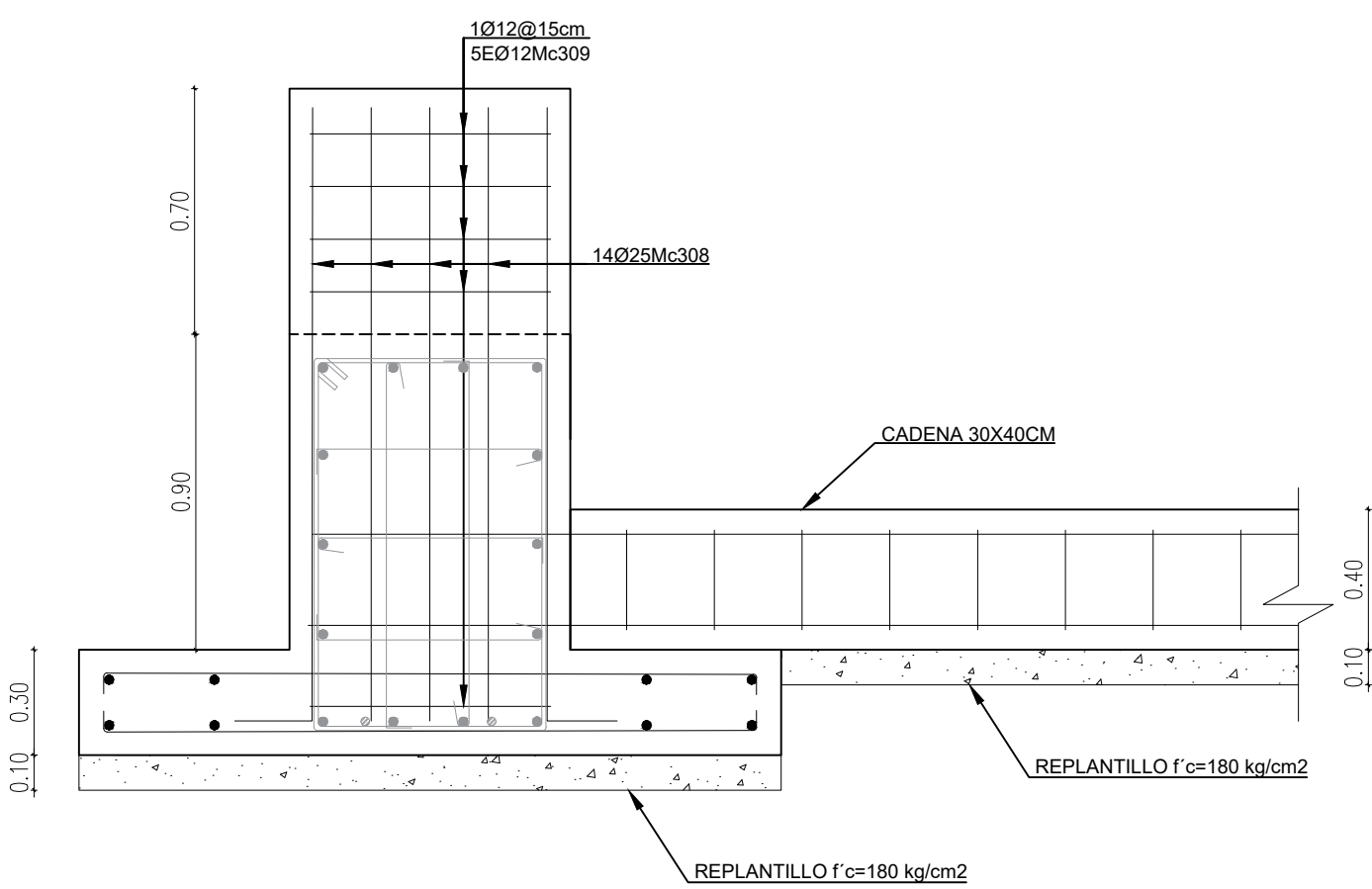


CORTE B-B  
ESC: 1:100

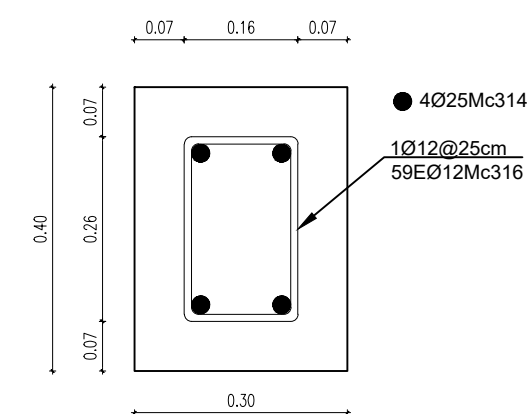
ARMADO CADENA  
(x2)  
ESC: 1:50



CORTE 1-1  
ZAPATA CORRIDA  
ESC: 1:20



CORTE 2-2  
ZAPATA CORRIDA Y PEDESTAL  
ESC: 1:20



ARMADO CADENA 30X40cm  
(x2)  
ESC: 1:10

PLANILLA DE ACEROS											
MC	TIPO	Ø (mm)	No.	DIMENSIONES (m)				LONG. Desar (m)	LONG. TOTAL (m)	PESO (kg)	Observ.
				a	b	c	d				
ZAPATA CORRIDA											
300	L	25	44	6.00	0.20			6.20	272.8	1051.10	
301	I	25	44	8.00				8.00	352	1356.26	
302	L	25	4	3.20	0.20			3.40	13.6	52.40	
303	I	25	4	4.80				4.80	19.2	73.98	
304	C	25	148	1.86				2.26	334.48	1288.75	
305	O	12	90	1.06	0.66		0.10	0.10	3.64	377.6	290.91
306	I	12	180	1.06				0.10	2.32	417.6	370.83
307	I	12	270	0.66				0.10	1.52	410.4	364.44
PEDESTALES											
308	L	25	28	1.74	0.20			1.94	54.32	209.29	
309	O	12	10	0.72	0.72			0.19	3.08	30.80	27.35
310	I	12	20	0.72				0.10	0.92	18.40	16.34
311	L	25	60	1.74	0.20			1.94	116.40	448.49	
312	O	12	20	1.09	0.72			0.10	3.82	76.40	67.84
313	I	12	50	0.72				0.10	0.92	46.00	40.85
CADENAS											
314	L	25	8	11	0.20				11.20	89.60	345.23
315	L	25	8	4.01	0.20				4.21	33.68	129.77
316	O	12	96	0.26	0.16		0.08		1.00	96.00	85.25
RESUMEN DE MATERIALES											
Ø (mm)	8	10	12	14	16	18	20	22	25	28	32
W (kg/m)	0.395	0.617	0.888	1.208	1.578	2.000	2.464	2.984	3.853	4.834	6.310
L (m)	0.00	0.00	1327.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1286.08	0.00	0.00
PESO (kg)	0.00	0.00	1178.55	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4955.27	0.00	0.00
Total (kg) = 7108.38											

TIPOS DE DOBLADO											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

ESPECIFICACIONES TECNICAS:											
Esfuerzo admisible del suelo 15 Tn/m²											
Hormigón f'c= 280 Kg/cm²											
Acero fy= 4200 Kg/cm² en forma de varilla milimetrada corrugada											
Traslapes mínimos si no se indican en los planos = 40 diámetros de la varilla.											
Se regirá a las normas y recomendaciones de la NEC 2015											
Las dimensiones se expresan en metros.											
Los Recubrimientos serán de 5cm para losa y 4 para los demas elementos											

FILE NAME	Material:	Thermal treatment:	Weight:
SIZE	A1	SHEET	E: 2 DE 2
DRAWN		Design activity	SCALE
CHECK			ESP
APPR.			
REV.			
DATE			
PLANO DE CIMENTACIÓN			
TRANSPORTADOR DE CARGA EN CALIENTE			
DWG NO			